



Universidad Autónoma de San Luis Potosí
Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**Estimación del estrés hídrico de *Vitis vinifera* mediante
percepción remota en zona de viñedos del municipio de
San Luis Potosí**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Patricia Alegría Núñez

Asesor:

Dr. Abraham Cárdenas Tristán



“La gente olvidará lo que dijiste,
olvidará lo que hiciste,
pero nunca olvidará
cómo la hiciste sentir”

Maya Angelou

DEDICATORIA

Dedico todo el esfuerzo y trabajo que culminó en esta tesis a mi familia, a mi pareja Daniel y a mis amigos. Ellos fueron el pilar y el más grande apoyo emocional durante estos dos años de maestría.

A mis padres, Susana y Víctor Hugo, por ayudarme siempre, emocional y económicamente ☺, gracias por el amor y por ser los mejores padres. A mi hermano Víctor Manuel (Q.E.P.D) por escucharme durante las noches de desvelo. A mis abuelos, mamá Chole y papá Juan, gracias por amarme tanto y siempre dar consuelo, también a mi abue Nacha (Q.E.P.D) que sé que siempre estás acompañándome, y a mi abue Julian. A ti, tía hermosa Alma Laura Alegría, tu que siempre estás cuando más te necesito, en las buenas y en las malas. Los amo mucho, familia.

A mis pequeños gigantes, Miguel y Mariana, para que vean en mi un ejemplo a seguir.

Con todo el amor del mundo, mi trabajo es por y para ustedes.

Paty

AGRADECIMIENTOS

Creo que este apartado es sin duda uno de los más importantes, ya que logro dar mis más sinceros agradecimientos a cada una de las personas e instituciones que hicieron posible que hoy sea Maestra en Tecnología y Gestión del Agua.

Karla Lucely, amiga mía y hermana de vida, gracias por creer en mí e influir en un 100% en que aplicara a la maestría, aun después de decirte tantas y tantas veces que no.

Agradezco profundamente a los profesores del posgrado en Tecnología y Gestión del Agua que estuvieron conmigo a lo largo de estos dos años de estudio. Al posgrado en T y GA y a CONACYT. Al maestro Andrés Ovalle por brindarme una bonita amistad y contribuir siempre en mi formación académica.

Gracias Dr. Abraham Cárdenas Tristán por ser un gran guía en mi crecimiento profesional y por confiar en mis capacidades, sin duda alguna, es usted un gran mentor. Dr. Rodolfo Cisneros y Dr. Hilario Charcas Salazar, gracias por reforzar mis conocimientos. A la Dra. María Elena, al Ing. Javier Cisneros y al Ing. Héctor, les agradezco infinitamente su colaboración en el proyecto y su amistad.


A la Vinícola PdL por permitirnos desarrollar el proyecto de investigación en su área productiva y por toda su colaboración. Y a Geodrones por su participación y enfoque a lo largo de todo el proyecto.

Gracias a mi familia Alegría Núñez por confiar siempre en mí y también por que estuvieron al pie del cañón presionando para que diera más de lo que podía. A mis abuelos por ser el pilar fundamental en la familia. A mis padres por su gran ejemplo de trabajo, perseverancia, amor y amistad. A las tías más bellas, Alma y Linda, que son más hermanas que tías, y a los más peques de la familia.

A los nuevos y buenos amigos Carlos, Fabricio, Martín, Raúl, Nancy, Sofí y Jackie, por hacer más amenos estos dos años, por las vivencias, las risas, las aventuras y el cariño mutuo.

Y que dijeron, ¿Dónde quedó Flori y Daniel? ¡Pues sorpresa!

A mi buena amiga Flori, por ser y por estar. Gracias Flor por ser la fiel colaboradora y siempre hacerme reír, hiciste de los peores días los mejores. Por alentarme siempre y echar porras cuando ya no podía ni un minuto más.

Y a mi compañero de tesis, Daniel González. Gracias por todo, por formar conmigo un gran equipo de trabajo y nunca dejarme sola. Por escuchar, soportar, por amar y por ser quien eres, porque gracias a ti, hoy soy una mejor persona. Te amo cielo. 

RESUMEN

El estado hídrico del cultivo de vid para vino es la variable de mayor interés de estudio en los sistemas productivos, pues es el factor determinante para el rendimiento y la calidad del producto final; la variabilidad hídrica de las zonas productivas está en sincronía con el varietal en producción, las condiciones meteorológico-climáticas, las variables fisicoquímicas del suelo y el recurso hídrico. La estimación del estrés hídrico permite, por un lado, caracterizar las variedades de acuerdo a su grado de sensibilidad al estrés hídrico y adaptar el sistema de riego de acuerdo a su necesidad, por otro lado, se logra diferenciar la calidad del fruto y dirigirla a un procesamiento de elaboración de vino de mejor calidad. El objetivo de este estudio fue determinar el grado de estrés hídrico de las diferentes variedades de *Vitis vinifera* en producción en viñedos del municipio de San Luis Potosí a partir de modelos de distribución y monitoreo geoespacial utilizando imágenes multiespectrales de satélite e imágenes de sensores multiespectrales de corto alcance con la ayuda de un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT). Las tecnologías geoespaciales, la determinación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c), el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI), el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) y la caracterización de las condiciones fisicoquímicas del suelo y agua de la zona de estudio, permitieron obtener un amplio panorama de la condición del estado hídrico del cultivo a lo largo de su ciclo vegetativo y reproductivo.

ABSTRACT

The hydric state of vine crop for wine is the most interesting variable of study in the productive systems, because it is the determining factor to the yield and quality of the final product; the hydric variability of the productive zones is in synchrony with the variety in production, the meteorological conditions, the physiochemical variables of the soil and hydric resource. The estimation of the hydric stress allows, on one hand, characterize the varieties according to their degree of sensitivity to hydric stress and adapt the irrigation system according to their need, on the other hand, it is possible to differentiate the quality of the fruit and direct it to a better quality wine making process. The aim of this study is to determine the degree of water stress of the different varieties of *Vitis vinifera* in production of vineyards in the municipality of San Luis Potosí from distribution and monitoring geospatial models using multispectral sensor images and geospatial technologies images to quickly reach with the help of an unmanned aerial vehicle (UAV). Geospatial technologies, the determination of crop evapotranspiration (ET c), the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), the Normalized Differential Water Index (NDWI), Crop Water Stress Index (CWSI) and physiochemical conditions of the soil and water in the study area, permit you to understand a wide panorama of the condition of the hydric state of the crop throughout its vegetative and reproductive cycle.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES.....	5
PROBLEMÁTICA.....	10
Estado del arte: Necesidad de la evaluación del requerimiento hídrico en zonas agrícolas a nivel nacional e internacional	10
PROBLEMÁTICA.....	15
Estado del arte de la problemática: Metodologías de distribución espacial en el manejo del recurso hídrico en zonas productoras de vid a nivel internacional.....	15
HIPÓTESIS.....	18
OBJETIVO GENERAL.....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
METODOLOGÍA.....	19
SINOPSIS.....	25
CAPÍTULO 1 DESCRIPCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA, SUELO, PLANTA Y ATMÓSFERA DE LA ZONA DE ESTUDIO.	27
1.1 Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera.....	27
1.2 Descripción de la zona en estudio.....	28
1.3 Descripción del agua de riego utilizada en la zona de estudio.....	29
1.4 Representación de la microcuenca.....	31
1.5 Descripción de suelo y topografía de la zona en estudio.....	32
1.6 Caracterización del cultivo <i>Vitis vinifera</i>	32
1.6.1 Caracterización de variedades y ciclo fenológico.....	33
1.7 Caracterización meteoro-climática de la zona en estudio.....	38
1.8 Conclusiones del capítulo 1.....	40
1.9 Abreviaciones del capítulo 1.....	41
1.10 Bibliografía del capítulo 1.....	42
CAPÍTULO 2 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y AGUA DE RIEGO DE LA ZONA DE ESTUDIO.	45
2.1 Nutrición de suelos.....	45

2.1.1	Determinación de puntos de muestreo.....	46
2.1.2	Metodología para la recolección de muestras.....	47
2.1.3	Metodologías de Análisis edafológicos básicos en laboratorio.....	49
2.1.4	Análisis geoestadístico y mapas esquemáticos.....	59
2.1.5	Correlación de resultados de análisis fisicoquímicos.....	81
2.1.6	Conclusiones del capítulo 2. Apartado suelo.....	85
2.2	Calidad de agua de riego.....	86
2.2.1	Metodología para la recolección de muestras.....	87
2.2.2	Metodologías de Análisis químico en laboratorio.....	87
2.2.3	Caracterización de la calidad del agua para riego.....	87
2.3	Humedad en suelo.....	93
2.4	Integración y generalidades del continuo Agua, Suelo, Planta y Atmósfera.....	95
2.5	Conclusiones del capítulo 2. Apartado agua.....	97
2.6	Abreviaciones del capítulo 2.....	98
2.7	Bibliografía del capítulo 2.....	99

CAPÍTULO 3 DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI) CON EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES. 104

3.1	Tecnologías geoespaciales en el campo de la agricultura de precisión.....	104
3.1.1	Tecnologías aplicables en agricultura de precisión en vid.....	105
3.1.2	Caracterización de VANT y sensores utilizados.....	106
3.2	Descripción de los parámetros considerados para los vuelos en campo desde un VANT.....	110
3.3	Descripción de las etapas de un vuelo para restitución de imágenes.....	111
3.4	Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI).....	116
3.5	Determinación del NDVI e interpretación de mapas esquemáticos para seis etapas del ciclo vegetativo reproductivo de la vid.....	118
3.6	Conclusiones del capítulo 3.....	124
3.7	Abreviaciones del capítulo 3.....	126
3.8	Bibliografía del capítulo 3.....	127

CAPÍTULO 4 CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO ($ET_{c\ aj}$) MEDIANTE DOS METODOLOGÍAS, UTILIZANDO DATOS METEOROLÓGICOS Y VALORES DE NDVI... 129

4.1	Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar.....	129
-----	--	-----

4.2	Variables que constituyen la Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico	130
4.3	Interpretación de mapas esquemáticos de la Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico.	134
4.4	Estadísticas de evapotranspiración del cultivo	143
4.5	Conclusiones del capítulo 4.....	147
4.6	Abreviaciones del capítulo 4	148
4.7	Bibliografía del capítulo 4.....	149
CAPÍTULO 5 DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DIFERENCIAL DE AGUA NORMALIZADO (NDWI) CON EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES.....		151
5.1	Uso de imágenes satelitales multiespectrales para la determinación del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).....	151
5.1.1	Preprocesamiento de las imágenes satelitales Landsat-8 OLI.....	154
5.2	Índice Diferencia de Agua Normalizado (NDWI)	157
5.3	Interpretación de mapas esquemáticos del NDWI	159
5.4	Conclusiones del capítulo 5.....	167
5.5	Abreviaciones del capítulo 5	169
5.6	Bibliografía del capítulo 5.....	170
CAPÍTULO 6 DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO (CWSI).....		172
6.1	Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI).....	172
6.2	Estadísticas de la distribución del estrés hídrico a lo largo del ciclo vegetativo de la vid	176
6.3	Relación de CWSI y el potencial hídrico del suelo	182
6.4	Conclusiones del capítulo 6.....	187
6.5	Abreviaciones del capítulo 6	189
6.6	Bibliografía del capítulo 6.....	190
CONCLUSIONES		193
BIBLIOGRAFÍA.....		195

Lista ilustraciones

Ilustración 1. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 1.	19
Ilustración 2. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 2.	20
Ilustración 3. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 3.	21
Ilustración 4. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 4.	22
Ilustración 5. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 5.	23
Ilustración 6. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 6.	24

Lista cuadros

Cuadro 1. Taxonomía de <i>Vitis vinifera</i>	33
Cuadro 2. Clasificación de pH del suelo y agua (Norma NOM-021-RECNAT-2000).	52
Cuadro 3. Clasificación de CE del suelo y agua (Norma NOM-021-RECNAT-2000).	52
Cuadro 4. Clasificación de contenido de materia orgánica en suelo (Norma NOM-021-RECNAT-2000).	53
Cuadro 5. Rango de concentración de Nitratos en suelo (Agrolab, 2005).	66
Cuadro 6. Rango de concentración de K^+ en suelo.	74
Cuadro 7. Rango de concentración de Mg^{2+} en suelo.	76
Cuadro 8. Recomendación de uso de suelo y agua para la agricultura (Eaton, 1950).	77
Cuadro 9. Efecto de la concentración de Cl^- en agua de riego (Sela, 2017).	79
Cuadro 10. Coeficientes de correlación entre las variables analizada Finca 1 en el software InfoStat.	81
Cuadro 11. Rango de concentración de calcio en suelo.	81
Cuadro 12. Coeficientes de correlación entre las variables analizada Finca 2 en el software InfoStat.	83
Cuadro 13. Rango de concentración de SDT en agua de riego.	88

Cuadro 14. Resultados de pH, CE, SDT en agua de riego de las fincas en estudio.	88
Cuadro 15. Resultados de iones analizados en agua de riego de las fincas en estudio.	89
Cuadro 16. Directrices para las interpretaciones de la calidad del agua para el riego (Ayers y Westcot, 1994).....	90
Cuadro 17. Variables analizadas para la clasificación de calidad del agua de riego.....	91
Cuadro 18. Rango habitual de concentración de iones en un agua de riego (Ayers y Westcot, 1994).	91
Cuadro 19. Fechas de vuelo en la zona de estudio.	106
Cuadro 20. Especificaciones de la aeronave PHANTOM 3 PROFESSIONAL.	107
Cuadro 21. Especificaciones del Sensor RGB 1 / 2.3 CMOS.	109
Cuadro 22. Especificaciones del Sensor R+NIR Survey2.....	110
Cuadro 23. Variables presentes en los tiempos de vuelo.	112
Cuadro 24. Fechas de ejecución de vuelo y etapa del ciclo vegetativo reproductivo en función.	118
Cuadro 25. Determinación de la correlación ente en grado de evapotranspiración con los métodos K_{cb} -calculado con base al manual #56 de la FAO y el K_{cb} calculado a partir del valor de NDVI, InfoStat.	144
Cuadro 26. Variables de interés del Sensor LANDSAT-8 OLI (USGS, 2013).	154
Cuadro 27. Fechas de toma de imágenes de satélite LANDSAT-8 OLI.....	159

Lista de figuras

Figura 1. Distribución de la necesidad hídrica de la vid a lo largo de su ciclo vegetativo y reproductivo.	30
Figura 2. Modelo de cintilla utilizada en el riego por goteo en la zona de estudio.	30
Figura 3. Delimitación de la subcuenca en la que se ubica la zona de estudio.....	31
Figura 4. Densidad de siembra de <i>Vitis vinifera</i>	33
Figura 5. Área productiva de 10 Ha en Finca 1.	33
Figura 6. Área productiva de 1 Ha en Finca 2.	34
Figura 7. Delimitación de variedades Finca 1.....	37
Figura 8. Delimitación de variedades Finca 2.....	37
Figura 9. Estadios del ciclo vegetativo y reproductivo de la vid en el estado de San Luis Potosí.	38
Figura 10. Delimitación de bloques y puntos de muestreo de la Finca 1.	46
Figura 11. Delimitación de bloques y puntos de muestreo de la Finca 2.	47
Figura 12. Ejemplo de recolección de muestra compuesta para un bloque de estudio.....	48
Figura 13. Ejemplo de pretratamiento en laboratorio para una muestra en estudio.....	49
Figura 14. Triángulo de texturas.....	50
Figura 15. Ejemplo de determinación de textura por el método de Hidrómetro de Bouyoucos....	50
Figura 16. Ejemplo de la práctica: extracto de saturación para una muestra en estudio.	51
Figura 17. Determinación de materia orgánica con el uso de HACH/2000.	53
Figura 18. Determinación de NO_3^- con el uso de HACH/2000.....	53
Figura 19. Determinación de NO_2^- con el uso de HACH/2000.	54
Figura 20. Diagrama del Ciclo del Nitrógeno (MacFaddin. J. 2003).	54
Figura 21. Determinación de SO_4^{2-} con el uso de HACH/2000.....	55
Figura 22. Espectrofotómetro de flama utilizado para la determinación de Na^+ y K^+	56

Figura 23. Determinación de dureza total con el método de titulación volumétrico.....	56
Figura 24. Determinación de Ca^{2+} con el método de titulación volumétrico.	57
Figura 25. Determinación de CO_3^{2-} con el método de titulación volumétrica.	58
Figura 26. Determinación de HCO_3^- con el método de titulación volumétrica.....	58
Figura 27. Determinación de Cl^- con el método de titulación volumétrica.	59
Figura 28. Caracterización de tipo de textura en la Finca 1.	60
Figura 29. Caracterización de tipo de textura en la Finca 2.	61
Figura 30 . Variabilidad de pH de suelo en la Finca 1.	62
Figura 31. Variabilidad de pH de suelo en la Finca 2.	62
Figura 32. Variabilidad de CE de suelo en la Finca 1.	63
Figura 33. Variabilidad de CE de suelo en la Finca 2.	63
Figura 34. Variabilidad de la concentración de materia orgánica del suelo en la Finca 1.	64
Figura 35. Variabilidad de la concentración de materia orgánica del suelo en la Finca 2.	65
Figura 36. Variabilidad de la concentración NO_3^- del suelo en la Finca 1.....	66
Figura 37. Variabilidad de la concentración de NO_3^- del suelo en la Finca 2.....	66
Figura 38. Variabilidad de la concentración NO_2^- del suelo en la Finca 1.....	67
Figura 39. Variabilidad de la concentración NO_2^- del suelo en la Finca 2.....	68
Figura 40. Variabilidad de la concentración de NH_4^+ del suelo en la Finca 1.....	68
Figura 41. Variabilidad de la concentración de NH_4^+ del suelo en la Finca 2.	69
Figura 42. Variabilidad de la concentración de SO_4^{2-} del suelo en la Finca 1.	70
Figura 43. Variabilidad de la concentración de SO_4^{2-} del suelo en la Finca 2.	70
Figura 44. Variabilidad de la concentración de Na^+ del suelo en la Finca 1.....	71
Figura 45. Variabilidad de la concentración de Na^+ del suelo en la Finca 2.....	72
Figura 48. Variabilidad de la PSI del suelo en la Finca 1.	73

Figura 49. Variabilidad de la PSI del suelo en la Finca 2.....	73
Figura 50. Variabilidad de K^+ del suelo en la Finca 1.	75
Figura 51. Variabilidad de K^+ del suelo en la Finca 2.	75
Figura 52. Variabilidad de Mg^{2+} del suelo en la Finca 1.	76
Figura 53. Variabilidad de Mg^{2+} del suelo en la Finca 1.	77
Figura 54. Variabilidad de CSR del suelo en la Finca 1.	78
Figura 55. Variabilidad de CSR del suelo en la Finca 2.	78
Figura 56. Variabilidad de Cl^- del suelo en la Finca 1.	80
Figura 57. Variabilidad de Cl^- del suelo en la Finca 2.	80
Figura 58. Diagrama de clasificación de riesgo de sodicidad y salinidad (Richards, 1954).	92
Figura 59. Distribución de la Humedad del suelo en la Finca 1.	94
Figura 60. Distribución de la Humedad del suelo en la Finca 2.	95
Figura 61. Aeronave PHANTOM 3 PROFESSIONAL.	107
Figura 62. Sensor RGB 1/2.3 CMOS.....	108
Figura 63. Sensor MAPIR Survey2.	109
Figura 64. Metodología del proceso de vuelo con un VANT para restitución fotogramétrica....	112
Figura 65. Planeación de misión de vuelo.	113
Figura 66. Ejecución de misión de vuelo.	113
Figura 67. Proceso de ejecución de vuelo en zona de estudio.	114
Figura 68. Preprocesamiento de la información de vuelo.....	115
Figura 69. Ecuación NDVI (Tucker, 1979)	117
Figura 70. Diseño descriptivo del NDVI en una planta sana y una planta seca.	117
Figura 71. Determinación de NDVI para la Finca 1, pasando 10 días después de la cosecha. A 28 días del mes de septiembre del 2017.....	118

Figura 72. Determinación de NDVI para la Finca 2, en el periodo de inicio del agostamiento. A 15 días del mes de noviembre del 2017.....	119
Figura 73. Determinación de NDVI para la Finca 1, en el periodo de inicio del reposo invernal. A 20 días del mes de diciembre del 2017.....	120
Figura 74. Determinación de NDVI para la Finca 2, durante el periodo final del reposo invernal. A 21 días del mes de enero del 2018.....	121
Figura 75. Determinación de NDVI para la Finca 2, en el término de floración e inicio del periodo de cuajado. A 28 días del mes de mayo del 2018.....	122
Figura 76. Determinación de NDVI para la Finca 1, durante la etapa de cuajado de fruto. A 21 días del mes de junio del 2018.	122
Figura 77. Ecuación de ET _c bajo condiciones de estrés hídrico.	130
Figura 78. Ecuación de Evapotranspiración del cultivo de referencia.	131
Figura 79. Ecuación de Coeficiente de estrés hídrico.	132
Figura 80. Ecuación de Coeficiente del cultivo.....	132
Figura 81. Ecuación de Coeficiente basal del cultivo con valores de K _{cb} (FAO, 2006).....	133
Figura 82. Ecuación de Coeficiente basal del cultivo con base a NDVI (Campos <i>et al.</i> , 2010).	133
Figura 83. Ecuación de Coeficiente de evaporación del suelo.	134
Figura 84. Determinación de ET _{c aj} basado en el cálculo de K _{cb} respecto al NDVI. A 28 días del mes de septiembre del 2017.....	135
Figura 85. Determinación de ET _{c aj} basado en el cálculo de K _{cb} respecto al NDVI. A 15 días del mes de noviembre del 2017.	136
Figura 86. Determinación de ET _{c aj} basado en el cálculo de K _{cb} respecto al NDVI. A 20 días del mes de diciembre del 217.	137
Figura 87. Determinación de ET _{c aj} basado en el cálculo de K _{cb} respecto al NDVI. A 31 días del mes de enero del 2018.	137
Figura 88. Determinación de ET _{c aj} basado en el cálculo de K _{cb} respecto al NDVI. A 28 días del mes de mayo del 2018.	138
Figura 89. Determinación de ET _{c aj} basado en el cálculo de K _{cb} respecto al NDVI. A 21 días del mes de junio del 2018.....	138

Figura 90. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 28 días del mes de septiembre del 2017.	140
Figura 91. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 15 días del mes de noviembre del 2017.....	140
Figura 92. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO Finca 1. A 20 días del mes de diciembre del 2017.....	141
Figura 93. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 31 días del mes de enero del 2018.....	141
Figura 94. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 28 días del mes de mayo del 2018.....	142
Figura 95. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 21 días del mes de junio del 2018.	142
Figura 96. Evolución del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado durante el ciclo productivo de la vid 2017-2018.....	143
Figura 97. Relación entre el valor de NDVI y el grado de $ET_{c_{aj}}$ calculado a partir del NDVI durante el ciclo productivo de la vid 2017 – 2018.....	144
Figura 98. Relación entre el grado de evapotranspiración a partir del $K_{cb\text{-calculado}}$ con base a el manual #56 de la FAO y el K_{cb} estimado a partir del valor de NDVI durante el ciclo productivo de la vid 2017-2018.	144
Figura 99. Evolución mensual de la Evapotranspiración diaria en el cultivo de la vid (Uriarte <i>et al.</i> , 2014; Zermeño <i>et al.</i> ,2017).....	145
Figura 100. Evolución del grado de Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico diaria (FAO, Penman-Monteith) durante el ciclo productivo de la vid 2017-2018 utilizando dos métodos de determinación ($ET_{c_{aj}}$ - NDVI y $ET_{c_{aj}}$ - K_{cb} calculado)	146
Figura 101. Ecuación de conversión de valores de nivel digital a valores de radiancia (USGS, 2017).	154
Figura 102. Ecuación de conversión de valores de radiancia a valores de reflectancia (USGS, 2017).	155
Figura 103. Comparación de resolución espacial de 30 m respecto a 1 m, en Finca 1.....	157
Figura 104. Ecuación para la determinación de NDWI con el uso de la banda verde y el infrarrojo cercano (McFeeters,1996).....	158

Figura 105. Ecuación para la determinación de NDWI con el uso de la banda del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio (Gao, 1996).....	158
Figura 106. Determinación del NDWI, preparación para el periodo de agostamiento. A 20 días del mes de octubre del 2017.	160
Figura 107. Determinación del NDWI, preparación para el periodo de agostamiento. A 20 días del mes de octubre del 2017.	161
Figura 108. Determinación del NDWI, inicios del periodo de agostamiento. A 05 días del mes de noviembre del 2017.	161
Figura 109. Determinación del NDWI, inicios del periodo de agostamiento. A 05 días del mes de noviembre del 2017.	162
Figura 110. Determinación del NDWI en el periodo de inicio del reposo invernal. A 23 días del mes de diciembre del 2017.	162
Figura 111. Determinación del NDWI en el periodo de inicio del reposo invernal. A 23 días del mes de diciembre del 2017.	163
Figura 112. Determinación del NDWI en el periodo medio del reposo invernal. A 08 días del mes de enero del 2018.	164
Figura 113. Determinación del NDWI en el periodo medio del reposo invernal. A 08 días del mes de enero del 2018.	164
Figura 114. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de floración. A 01 día del mes de mayo del 2018.	165
Figura 115. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de floración. A 01 día del mes de mayo del 2018.	165
Figura 116. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de cuajado del fruto. A 01 día del mes de junio del 2018.	166
Figura 117. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de cuajado del fruto. A 01 día del mes de junio del 2018.	166
Figura 118. Ecuación para la determinación de CWSI (Jackson <i>et al.</i> , 1981; Idso, 1982).	173
Figura 119. Ecuación para la estimación de Tc-Ta (Jackson <i>et al.</i> , 1981; Idso, 1982).	174
Figura 120. Ecuación para la estimación del Límite superior (Jackson <i>et al.</i> , 1981; Idso, 1981).	174

Figura 121. Ecuación para la estimación del Límite inferior (Jackson <i>et al.</i> , 1981; Idso, 1981).	175
Figura 122. Ejemplo de la distribución de los valores máximos y mínimos de estrés y la generación de las líneas UL y el LL.	175
Figura 123. Relación entre la temperatura del dosel del cultivo menos la temperatura del ambiente (Tc-Ta) y el déficit de presión de vapor (DPV) para las variedades Nebbiolo, Merlot, Cabernet Franc y Pinot Noir en la Finca 1. La línea azul representa la diferencia de Tc-Ta respecto al DPV. La línea naranja representa el límite superior bajo estrés hídrico del cultivo (UL). La línea gris representa el límite inferior sin estrés hídrico del cultivo (LL).	177
Figura 124. Relación entre la temperatura del dosel del cultivo menos la temperatura del ambiente (Tc-Ta) y el déficit de presión de vapor (DPV) para las variedades Cabernet Sauvignon, Sauvignon Blanc, Syrah, Viognier y Malbec. La línea azul representa la diferencia de Tc-Ta respecto al DPV. La línea naranja representa el límite superior bajo estrés hídrico del cultivo (UL). La línea gris representa el límite inferior sin estrés hídrico del cultivo (LL).	178
Figura 125. Variabilidad del estrés hídrico del cultivo caracterizado por variedades de vid en un ciclo productivo enero-diciembre 2017.	179
Figura 126. Variabilidad del estado hídrico de las variedades productivas en el periodo de abril a mayo del 2018.	181
Figura 127. Relación del índice de estrés hídrico del cultivo de la vid por variedad respecto al potencial hídrico (kPa) de los diferentes tipos de suelo presentes en la zona de estudio. Variedades en estudio: Viognier y Cabernet Franc.	184
Figura 128. Relación del índice de estrés hídrico del cultivo de la vid por variedad respecto al potencial hídrico (kPa) de los diferentes tipos de suelo presentes en la zona de estudio. Variedades en estudio: Syrah, Nebbiolo, Cabernet Sauvignon, Pinot Noir.	185
Figura 129. Relación del índice de estrés hídrico del cultivo de la vid por variedad respecto al potencial hídrico (kPa) de los diferentes tipos de suelo presentes en la zona de estudio. Variedades en estudio: Sauvignon Blanc, Malbec y Merlot.	186

INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso primordial de todo sistema y de ésta depende la productividad del campo y la calidad de vida de la sociedad, misma que es catalogada de dominio público y vital, además, de mantener el mayor valor económico y ambiental (Hernández y Betancourt, 2015).

El agua y el empleo están unidos desde una perspectiva económica, ambiental y social. Se estima que casi el 80% de los puestos de trabajo que constituyen a la fuerza laboral mundial dependen del acceso al recurso hídrico y de los servicios relacionados con él, incluyendo saneamiento. De manera que los empleos con los que se relaciona el mayor consumo del recurso hídrico son: la agricultura, silvicultura, pesca continental, minería, generación de energía, suministro de agua, saneamiento, industrias de manufactura, entre otros (UNESCO, 2016).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el 2016 mencionó que a través de la historia en nuestro país y hasta la actualidad, el sector agrícola es el principal dependiente del recurso hídrico, demandando hasta un 76.3% de la totalidad del recurso, del cual el 43% del agua utilizada proviene de fuentes subterráneas, mismas que logran cubrir el 35% de la superficie de riego del país. Por lo cual se estima que para el 2030 habrá un incremento del 14% en el agua destinada para riego agrícola (FAO, 2002).

En el 2014, CONAGUA dio a conocer que 104 de las 731 cuencas hidrológicas de México mostraban problemas de disponibilidad y déficit hídrico, y para el 2016 registró que entre 100 y 106 acuíferos se encontraban sobreexplotados, de manera que el proceso de sobreexplotación se da a partir de que la relación que se genera entre la extracción y la recarga no es equivalente (CONAGUA, 2016). Aunado a la sobreexplotación de las zonas de suministro de agua se exponen los eventos hidro-meteorológicos irregulares a lo largo de todo el país, como la presencia de lluvias torrenciales por cortos periodos de tiempo y sequías prolongadas, mismas que vuelven vulnerable a la zona productiva (CONAGUA, 2014).

Dado el alto grado de explotación del recurso hídrico por la agricultura, es fundamental el desarrollo de un plan tecnológico de manejo y distribución del líquido vital, que permita afrontar la situación prevista de escases y el incremento en la demanda hídrica por el sector agrícola.

Una de las opciones para la apropiada distribución del recurso hídrico es el uso de las tecnologías de Sistema de Información Geográfica (SIG), tecnologías que se definen como un conjunto de herramientas diseñadas para la integración de la información, preprocesamiento, procesamiento, análisis e interpretación de los resultados a partir de la generación de mapas geográficamente referenciados que respaldan la información obtenida y tienen como objetivo principal la resolución de problemas complejos de planificación y gestión (Botella *et al.*, 2011; ArcGIS, 2017).

El uso de los SIG en la agricultura permite evaluar la variabilidad de las variables en estudio y predecir con mayor exactitud el comportamiento de la zona de producción, basándose en principios económicos y consideraciones ecológicas con el fin de mantener o incrementar los rendimientos de la producción agrícola, además de satisfacer la necesidad de la demanda, pero conservando el entorno ambiental (Castellanos y Morales, 2016).

Las tecnologías geoespaciales como, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), sensores de campo, monitores de rendimiento e imágenes multiespectrales, así como una serie de metodologías y tratamiento de datos, se integran para que surja la Agricultura de Precisión (AP). La AP es un concepto en el ámbito de la economía y productividad agrícola que utiliza las tecnologías geoespaciales para el estudio de la variabilidad espacial y temporal de las variables que influyen en la producción agrícola (Ariel y Campanella, 2005), esto significa, optimizar la calidad y cantidad de un producto agrícola, minimizando el costo de producción a través del uso de tecnologías eficientes que se encarguen de reducir la variabilidad del proceso productivo de forma ambientalmente limpia (Best *et al.*, 2014), de manera que su objetivo principal es ofrecer al productor información puntual y confiable de las condiciones locales de la zona de producción, mismas que dirigen a la toma de decisiones de manejo (Castellanos y Morales, 2016), las cuales permiten la solución de problemáticas, como la mejora en la calidad, incremento del rendimiento, control de plagas y enfermedades, identificación de deficiencia de nutrición, determinación de sanidad y estrés hídrico del área productiva (IICA, 2014).

A diferencia de la agricultura tradicional, la AP tiende a la aplicación de prácticas agrícolas como siembra, fertilización, aplicación de agroquímicos y cosecha, todas las anteriores de forma variable y eficiente, todo en función de la información recolectada y analizada (Best *et al.*, 2014).

El recurso hídrico es uno de los cuatro (Agua, Suelo, Planta y Atmósfera) factores productivos que afectan directamente el rendimiento de los cultivos, mismo que puede ser manipulado mediante la tecnología de riego (López, 2000). Los cultivos demandan el agua del suelo, y ésta reemplaza la que se evapora, lo anterior para lograr mantener un equilibrio y un estado hídrico saludable que permita el apropiado desarrollo vegetativo y un rendimiento estable (FAO, 2006).

El estrés hídrico es el indicador más importante en la evolución de los rendimientos y calidad del fruto y acontece cuando el suelo se encuentra en decadencia hídrica y no logra abastecer la demanda del cultivo, también cuando la transpiración de la planta excede la absorción de agua por las raíces en un tiempo prolongado causado por una exigencia energética de la atmósfera (Lissarrague, 2012). De manera que la determinación y el monitoreo de la condición hídrica en el continuo agua-suelo-planta-atmosfera es sumamente importante para mantener un equilibrio hídrico y evitar el estrés en el cultivo. En la actualidad existen sistemas que permiten la determinación y control del déficit hídrico en las zonas productivas basándose desde el monitoreo en campo hasta el uso de la percepción remota. Para complementar cabe mencionar los siguientes modelos:

Detección de humedad de suelo: los sensores de humedad son una herramienta clásica para la determinación de su estado hídrico del suelo, éstos logran proveer de información del grado de humedad a diferentes profundidades del perfil de suelo (IICA, 2014), entre los más utilizados está el sensor Watermark, que es un sensor de matriz granular con sensores de resistencia eléctrica, formados por una matriz y dos electrodos. Su funcionamiento se basa en equilibrar el agua presente en la matriz granular respecto al agua actual del suelo y la resistencia eléctrica entre los electrodos es quien manda la señal del potencial hídrico al lector (Spectrum Technologies. Inc. 2008).

Evapotranspiración con base en datos de estación meteorológica: el estudio de la evapotranspiración con datos de las estaciones meteorológicas brinda información del estado hídrico del cultivo y del lugar en estudio, ya que ésta se ve afectada por condiciones de humedad de suelo y factores medioambientales, mismas variables que se registran en las estaciones de interés. La información obtenida es asociada a la especie vegetativa, permitiendo ser la base para el monitoreo eficiente del riego en la zona productiva (FAO, 2006).

Uso de imágenes multiespectrales: el uso de imágenes multiespectrales obtenidas desde satélites o sensores remotos desde un VANT, permiten la determinación del estrés hídrico del cultivo no detectable visiblemente, a partir de la interacción de la radiación con la vegetación (Boyer, 1995). Para la interpretación de la información debe de realizarse un procesamiento de las imágenes en estudio con la ayuda de software y modelos que identifican la condición de estrés hídrico. Los modelos más utilizados para la determinación del estado hídrico de zonas productivas son: el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) y el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI). El NDVI es el encargado del estudio del dosel de la vegetación y permite estimar la cantidad, calidad y desarrollo del dosel al estimar un valor de su <<verdor>> con base a mediciones de la intensidad de radiación en ciertas bandas del espectro electromagnético que la biomasa emite o refleja, de manera que es un indicador confiable de la vigorosidad de la vegetación (Meneses, 2011; Bellvert y Girona, 2012; Tucker, 1979; Rouse *et al.*, 1973). El NDWI es el índice más utilizado en la tecnología de percepción remota para la identificación de masas de agua, identificación y cuantificación de la cantidad de agua que posee la vegetación y el nivel de saturación de humedad de un suelo (Gao, 1996; McFeeters, 1996).

Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI): el CWSI es un indicador muy utilizado en la estimación de la deficiencia hídrica de los cultivos, se basa en la determinación de la temperatura del cultivo y del ambiente, y se sustenta en delimitar los niveles mínimos y máximos de estrés que puede presentar un cultivo debido a la disponibilidad o deficiencia de agua en el suelo (Taghvaeian *et al.*, 2012; Idso *et al.*, 1984; Idso, 1982; Jackson *et al.*, 1981). El CWSI se encuentra directamente relacionado con las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, con las condiciones ambientales y con las características fisicoquímicas del suelo, como el potencial hídrico (CATIE, 1982).

Debido a su importancia productiva, económica y social, el recurso hídrico es el principal objeto de estudio en la presente investigación, misma que lleva por nombre **“Estimación del estrés hídrico de *Vitis vinifera* mediante percepción remota en zona de viñedos del municipio de San Luis Potosí”**, dicho estudio presenta como objetivo global la determinación del estrés hídrico de diferentes variedades de *Vitis vinifera* a partir de un modelo de distribución y monitoreo geoespacial con el uso de imágenes multiespectrales y procesos de fotogrametría digital a través de vuelos programados con el uso de un vehículo aéreo no tripulado.

Se preguntarán, ¿Por qué *Vitis vinifera*?

El cultivo de vid (*Vitis vinifera*) es uno de los más antiguos del mundo, presenta una importancia económica, cultural y religiosa desde tiempos prehispánicos. El auge de la vitivinicultura en México se presentó con la introducción de la especie *Vitis vinifera* por los conquistadores, misma que se expandió a lo largo de todo el país (Martínez, 2013).

México es el país productor de vid más antiguo de América. La vid adquirió importancia comercial desde 1920 y hasta la actualidad la viticultura es una actividad económica con una evolución importante (Bernáldez y Olguín, 2003; Delgado, 2002). La vid se caracteriza por un consumo diversificado y por su alto valor económico. En el 2012 la Organización Internacional de la Viña y el Vino (OVI) mencionaron que el 67% de la producción mundial se destina a la elaboración de vino, el 31% de vid al mercado en fresco y solo el 2% es procesada como fruta seca (FAO, 2013; OIV, 2012).

Actualmente el cultivo de vid se produce en 14 estados de la República Mexicana, Aguascalientes, Baja California Norte y Sur, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Jalisco, Nuevo León, Puebla, Querétaro, Sonora, Zacatecas y San Luis Potosí, éstos son los estados que conforman la superficie sembrada de 36,379 hectáreas productivas. El estado de San Luis Potosí actualmente tiene una superficie activa de 130 hectáreas, todas trabajadas bajo sistemas de riego (SIAP, 2018).

La planta de vid demanda requerimientos específicos para su óptimo desarrollo, entre los cuales se encuentran las condiciones climatológicas y edafológicas de la zona donde se desarrolla (Pascual y Cabrerizo, 1995). El requerimiento hídrico es una de las consideraciones más relevantes para la obtención de fruto de calidad, éste permite su procesamiento y la producción de un vino con condiciones organolépticas de posicionamiento (Villareal *et al.*, 2007). Por lo que el control y monitoreo del estado hídrico de la plantación es de vital importancia en el sector vitivinícola. La necesidad hídrica de las parras para vino, en la mayoría de las zonas del país, no es abastecida con las precipitaciones, por lo tanto, surge la necesidad de suministrar riegos complementarios (Martínez, 2013) con monitoreo, en el momento indicado y con caudales exactos de acuerdo a la demanda hídrica del cultivo.

ANTECEDENTES

La industria del vino en México se encuentra en una fase de crecimiento en la que se experimentan un sinnúmero de cambios, entre ellos se encuentra la distribución al consumidor final a través de diferentes canales de comercialización. El vino mexicano presenta un enorme potencial, tanto, que comenzó a marcar una presencia importante en las importaciones, aún con una producción moderada, pero de manera exponencial (ICEX, 2015) contribuyendo en el 2016 en un 0.07% a la producción mundial (259 millones de hectolitros) (OVI, 2015).

México es un país de jóvenes y son ellos quienes impulsan la cultura del consumo del vino, logrando incrementar la demanda del producto hecho en México. En el 2015 la producción de vino en México fue de 19.4 millones de litros (MdL), mientras que el consumo nacional fue de 89.5 MdL, de manera que solamente el 30% del vino consumido es producido en México (Salomón, 2004; ICEX, 2015), el resto es importado desde las regiones vitivinícolas de renombre como Francia, Sudáfrica, Italia, España, Chile, Estados Unidos, ente otros (OVI, 2015). Según las estadísticas de ICEX (2015), para el año 2020 el consumo será de 180 MdL incrementado en un 100% el consumo en tan solo 5 años. Esta tendencia refiere un mayor interés por fortalecer la cultura de consumo de vino con el objetivo de mantener el ritmo de crecimiento en la demanda (Vera *et al.*, 2016). De manera que, para alcanzar el objetivo es necesario mantener las características organolépticas de un vino de altura, lo que se puede lograr con un control estricto de las condiciones de terroir de la zona de producción de la materia prima, la vid (*Vitis vinifera*).

La calidad de un vino se expresa en función del terroir, éste es el resultado del conjunto de factores que definen y describen la zona en donde se desarrolla el cultivo de vid, entre ellos el suelo, la condición hídrica, el clima, el paisaje y la tecnología (Baeza *et al.*, 2007).

La obtención de un vino de calidad con condiciones organolépticas favorables, requiere de una combinación de estrategias de riego que aseguren un conocimiento de las necesidades hídricas de la especie y un control restrictivo del estado hídrico del suelo, (McAlavy, 2004; Prichard, 2004; Williams, 2001; McCarthy, 2004; Pérez *et al.*, 2004; Goldhamer y Fereres, 2005).

El cultivo de vid ha mostrado una resistencia a los escasos hídrica, considerándose como un cultivo de secano, sin embargo, un déficit hídrico excesivo induce efectos negativos que ponen en riesgo la productividad de la planta. Una deficiencia de agua en la reserva del suelo afecta directamente la brotación y floración de la planta, misma que puede presentar limitaciones en su desarrollo y en la calidad del fruto, de forma que un estrés hídrico en los primeros días del periodo de cuajado, puede disminuir el grado de cuajado del fruto y pone en riesgo el rendimiento de la producción (Ferreira *et al.*, 2002). Por lo tanto, surge el interés y la necesidad del riego, el cual contribuye al abastecimiento de la demanda hídrica del cultivo y evitar problemas generados por la deficiencia (Baeza *et al.*, 2007).

La respuesta al riego por las diversas variedades de vid es muy heterogénea, esto se debe a la gran variabilidad genética que existe en cada una de los varietales, al tipo de suelo donde se desarrolla y a las condiciones de microclima que se genera en cada zona de producción, consecuentemente, se dificulta la determinación del grado de estrés hídrico de manera convencional en grandes áreas productivas. Por tanto, el uso de tecnologías y el conocimiento del ciclo vegetativo y reproductivo de la vid, posibilitan estudiar su estrés hídrico y controlar la disponibilidad hídrica del suelo (Deloire *et al.*, 2004).

A lo largo del tiempo se han desarrollado diversos métodos para estimar el grado de estrés hídrico de los cultivos, sin embargo, en el caso específico del cultivo de *Vitis vinifera* producida en México no se ha estudiado a profundidad su comportamiento. Hasta el momento los trabajos de investigación efectuados se han enfocado en el estudio y monitoreo de la tasa de evapotranspiración de las zonas productivas, el Índice de la Vegetación Diferencial Normalizado del cultivo, la fisiología del transporte hídrico, las estrategias de adaptación del cultivo al estrés hídrico y la programación de riego con el uso de sensores de humedad.

Un primer trabajo corresponde a Romero (2017), quien realizó la tesis para titulación de grado de Maestría en Ciencias que lleva por título “Variación de la edafología y estrés hídrico en *Vitis vinifera* con relación al relieve en un viñedo del Valle de Guadalupe, B.C., México”, en donde se determinó la relación entre la microtopografía y la hidrología, obtenida a escala local mediante mapeo de alta resolución, con la estructura del suelo y el estado de estrés hídrico en plantas de vid, utilizando muestreos edafológicos y fisiológicos.

En este estudio, la determinación del estado de estrés hídrico del cultivo de vid en las variedades Cabernet y Cabernet Sauvignon se llevó a cabo mediante la medición de la conductancia estomática con el uso de un porómetro foliar y la determinación del potencial hídrico de la hoja y el tallo con una cámara de presión modelo 1505D. Las mediciones se llevaron a cabo en dos momentos del día (mañana y tarde) en una muestra de 56 plantas de vid. El autor realizó un análisis estadístico y un modelo de interpolación con el método Kriging en ArcMap 10.4.1.

La investigación determinó una alta correlación entre la conductancia estomática y el potencial hídrico del cultivo (mayor grado de conductancia estomática menor grado de estrés hídrico), además que el potencial hídrico del tallo variaba en función de la edad de las plantas. También se determinó que a mayor concentración de materia orgánica en suelos la conductancia estomática era mayor en las plantas analizadas.

Un segundo estudio midió la “Tasa de evapotranspiración del cultivo de la vid y su relación con la de referencia del método FAO PENMAN-MONTEITH”, el autor Zermeño *et al.*, en el 2016 tenía como objetivo, determinar la tasa diaria de evapotranspiración del cultivo mediante el uso de dos metodologías, Penman-Monteith y Covarianza Eddy. El análisis fue desarrollado en un viñedo de la Vinícola San Lorenzo de Parras, Coahuila, México, para la variedad Syrah.

El estudio se llevó a cabo de abril a septiembre del 2014, en donde se delimitaron dos áreas de estudio de 5.2 hectáreas cada una. Ambas áreas fueron trabajadas bajo el mismo manejo agronómico incluyendo el riego, 2 horas por día con un gasto de 2.1 L por hora, con una lámina de 7 mm. Se determinó el grado de evapotranspiración diaria utilizando las variables propias de la estación meteorológica para cada uno de los modelos en estudio. Seguidamente el autor realizó una comparación de los datos obtenidos utilizando una prueba paramétrica de Wilcoxon para poblaciones pareadas. Los resultados de la investigación mostraron un mismo patrón de variación para ambos modelos en estudio, obteniendo un valor de R^2 de 0.87, además, el autor logró determinar los valores de los coeficientes del cultivo para cada mes de estudio y generar una curva de desarrollo vegetativo, misma que coincide con el grado de evapotranspiración calculado. El mes de septiembre mostró el valor de evapotranspiración más bajo del ciclo en estudio, coincidiendo con el desarrollo vegetativo del cultivo (después de cosecha).

La Investigación “Análisis de las estrategias de adaptación a la escasez hídrica de las empresas vitivinícolas del Valle de Guadalupe, B.C.” fue estudiado por Camacho, en el 2016, en donde propuso estrategias para la conservación del agua de manera rentable, simple, barata y manejable, ya que el Valle de Guadalupe ha presentado en los últimos años un desabasto hídrico, poniendo en riesgo la producción de vid para vino.

Las propuestas por el autor fueron recomendables para la zona de producción de *Vitis vinifera*, entre las cuales se encuentra el **riego por goteo**, el cual presenta como objetivo principal la reducción de pérdidas en los sistemas de riego, aplicando un sistema más eficiente con calendarización respecto al estado hídrico de la vegetación; en cuanto a la **cosecha de agua**, esta actividad tiene como principal propósito la recolección de la escorrentía excedente o residual con el objetivo de almacenarla y disponer de ella en situaciones de escasez, funcionando de manera eficiente a nivel local; **captación de lluvia**, este aprovechamiento se enfoca en la recolección de la escorrentía de tejados desde un aspecto técnico y eficiente; **captación de niebla**, el mecanismo de ésta estrategia consiste en que la niebla choque con el panel anteriormente establecido para su captación, al chocar se generan gotas de agua que se unen y desplazan hacia la zona de captación; **Hidrogel**, su propósito consiste en la aplicación e incorporación de un material absorbente al suelo, una vez que el material cumplió su función de absorción de agua, ésta estará disponible para la demanda hídrica de la planta, logrando reducir el agua de riego y la pérdida por infiltración; **reciclaje de agua** o aprovechamiento de aguas residuales es la última propuesta establecida por el autor y se enfoca en la reutilización de las aguas utilizadas anteriormente en el proceso industrial de las vitivinícolas.

El autor concluye que los productos vitivinícolas prefirieron tomar la iniciativa de implementar las estrategias de carácter agrícola, entre ellas, riego por goteo y uso de hidrogeles.

En el 2014 Gordillo *et al.*, desarrolló el estudio “Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales” en zona de viñedos de Hermosillo, Sonora, México. El autor trabajó con imágenes Landsat 5 TM y analizó el grado de evapotranspiración estimado a partir del algoritmo METRICTM (Mapeo de la evapotranspiración en alta resolución y con calibración internalizada) en el software Erdas Image, además de comparar la información

obtenida con datos medidos en un sistema de covarianza Eddy para cada imagen de estudio.

El modelo METRICTM calcula la evapotranspiración real basado en un balance de energía, calculando el flujo de calor latente empleando imágenes de satélite que contengan banda de onda corta y banda térmica con las correcciones radiométricas y atmosféricas pertinentes.

El sistema de covarianza Eddy, permite evaluar el flujo de calor latente y sensible a partir de las variaciones de la velocidad del viento y la densidad de vapor de agua y temperatura.

Una vez obtenidos los valores de evapotranspiración de cada modelo en estudio se realizaron representaciones gráficas y un análisis estadístico. El resultado para la relación de la evapotranspiración del cultivo estimada a partir de los dos modelos, mostró un valor de R^2 de 0.975, por lo que el autor describe una relación lineal existente entre los datos estimados y concluye que no hay diferencia estadísticamente significativa entre los dos modelos evaluados y recomienda el uso de imágenes satelitales para la estimación de la evapotranspiración de los cultivos, ya que éstas permiten conocer el comportamiento espacial y temporal de la variable en estudio.

Er-Raki, S *et al.*, son los autores del artículo “Determinación of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid región of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index” publicado en el 2013. El objetivo principal de la investigación fue desarrollar y evaluar la relación entre Índice Diferencial de Vegetación Normalizado y el coeficiente basal del cultivo, para la estimación de la evapotranspiración (ET_c) de uva de mesa. El estudio se desarrolló en la costa de Hermosillo Sonora, México, en dos parcelas experimentales de vid de 10 hectáreas cada una, con un tiempo de análisis de 2 años (2005-2006).

El coeficiente basal y el grado de evapotranspiración del cultivo fue estimado utilizando la ecuación de Penman-Monteith, recomendado por la FAO. Las variables meteorológicas utilizadas para la determinación de la evapotranspiración fueron medidas en la zona de estudio además de complementar la información con el sistema de covarianza Eddy.

Para la determinación del NDVI, el autor trabajó en un primero momento con mediciones de reflectancia en campo, utilizando un radiómetro portátil. Las mediciones se realizaron en a lo largo de 100 m lineales, se utilizó la banda roja e infrarrojo cercano para el desarrollo del índice en estudio.

Los resultados de la investigación mencionan que se encontró una relación lineal entre el grado de calor latente y la radiación neta de la zona de estudio; con respecto a comportamiento del NDVI, se observaron valores de 0.1 hasta 1, indicando que el cultivo nunca estuvo bajo un déficit hídrico, además de presentar una relación directa entre el valor de NDVI, el coeficiente basal del cultivo y el ciclo vegetativo. Respecto a la relación existente entre el coeficiente del cultivo y el NDVI, el autor obtuvo un valor de R^2 de 0.63, lo que determina que el coeficiente basal del cultivo estimado, permite la determinación confiable del grado de evapotranspiración de *Vitis vinifera*.

El estudio “Programación del riego de vid de mesa “Perlette” y “Sugraone” con sensores de humedad” fue trabajado por Payán, *et al.*, en el 2013 en un viñedo de Hermosillo, Sonora, México. El principal objetivo fue evaluar el efecto de la reducción de la lámina de riego anual en el rendimiento y calidad de los cultivares “Perlette” y “Sugraone” durante los años 2007 y 2008.

Se evaluaron tres tratamientos, al 70% de ET_c con goteros autocompensados de 1.6 L/h, al 100% de ET_c con goteros autocompensados de 2.3 L/h y un 100 % de ET_c con goteros autocompensados de 3.5 L/h. El diseño experimental trabajado, fue en bloques completos al azar con 15 repeticiones, cada bloque constó de 3 hileras de cultivo por 100 m de largo. Los riegos fueron programados con base en la evapotranspiración del cultivo, calculada previamente. El monitoreo de la humedad se controló con sensores de resistencia eléctrica marca Watermark, indicando los cambios de humedad del suelo expresada en centibares.

El autor analizó las variables: número de racimo, peso de racimo, rendimiento por planta, diámetro de baya y sólidos solubles.

Los resultados obtenidos en el estudio de Payán, *et al.*, mostraron que, aun cuando se realizó una restricción del riego, las variedades en estudio no se vieron afectadas con respecto al rendimiento y calidad del fruto durante los dos años evaluados, por lo que propone que el estudio debe de realizarse por al menos 5 años consecutivos para observar la variabilidad a lo largo del tiempo. Además, agrega que el monitoreo de la humedad del suelo permite optimizar el uso del recurso hídrico en un 30%.

Los antecedentes presentados se relacionan directamente con el marco de la presente investigación, ya que se enfocan en el estudio y monitoreo de la deficiencia hídrica del suelo y su impacto en el estado hídrico del cultivo de *Vitis vinifera*.

PROBLEMÁTICA

Estado del arte: Necesidad de la evaluación del requerimiento hídrico en zonas agrícolas a nivel nacional e internacional

El agua es un recurso cada vez más escaso y el más valioso del mundo, la agricultura, la industria y las ciudades, están abusando del recurso hídrico y no cabe duda que la creciente escasez y el mal aprovechamiento del agua dulce constituyen una grave amenaza para el desarrollo sostenible.

El sector agrícola es el que absorbe la mayor cantidad de agua a nivel mundial, más de dos terceras partes del recurso hídrico extraído de ríos, lagos y acuíferos es destinado para el riego agrícola (FAO, 1993). La agricultura en el siglo XXI se enfrenta a múltiples retos, tiene que producir más alimentos con el objetivo de solventar la demanda de una población creciente, así como también tiene la responsabilidad de producir materias primas para un mercado de bioenergía, y contribuir en el adelanto de los países en desarrollo dependientes de la agricultura (FAO, 2009).

Para el 2050 la población mundial superará los 9,000 millones de personas, misma que necesitará un 60% más de alimento para abastecer la demanda, por lo tanto, la agricultura seguirá siendo el mayor consumidor del recurso hídrico a nivel mundial. Para entonces, el suministro de agua en muchas regiones se habrá reducido por el consumo excesivo y mala administración, por la degradación de los recursos, influencia del cambio climático, incluyendo patrones inusuales de precipitaciones, temperatura y fenómenos meteorológicos extremos como sequías y ciclones. Por lo tanto, inducen a que el sector agrícola de pequeños, medianos y grandes productores modifiquen sus prácticas productivas convencionales y adoptar métodos tecnológicos que permitan un uso y distribución apropiado del recurso hídrico, una reducción de las pérdidas del líquido vital, además de minimizar el impacto ambiental y conseguir una producción más eficiente y sostenible que permita incrementar los rendimientos en la producción (FAO, 2015; FAO, 2009).

Aunado a la escasez hídrica, se presentan problemas de deterioro de la calidad del agua, ya sea por contaminación antropogénica o natural, y la imposibilidad de solventar inversiones para el tratamiento y mejora de sus características fisicoquímicas (Ongley, 1997).

Todo lo anterior constituye una preocupación y encamina el estudio sobre la “Necesidad de la evaluación del requerimiento hídrico en zonas agrícolas a nivel internacional y nacional” con el objetivo de identificar problemas críticos de la condición fisicoquímica del agua utilizada en los sistemas de riego agrícola, la escasez del recurso hídrico, la calidad y distribución del líquido vital y la demanda hídrica de los cultivos y conflictos que puedan presentarse.

A continuación, se muestra una recopilación de investigaciones relacionadas en el marco de la problemática propuesta.

Coela y Tarquí (2017) realizaron una investigación que lleva por título “Evaluación de la demanda de los recursos hídricos en el riego tradicional de la cuenca Azanaques”, dicha cuenca está ubicada en la zona productiva agrícola y pecuaria del Altiplano central de Bolivia, específicamente en el departamento de Oruro y se ha convertido en el principal factor limitante del desarrollo agropecuario de la zona, ya que es la principal fuente del recurso hídrico y ha sufrido una escasez asociada a los riesgos climáticos y la sobreexplotación del recurso.

La zona agropecuaria en estudio se caracteriza por bajas precipitaciones y una alta evapotranspiración, razón que lleva a la necesidad de riegos complementarios. Por lo que el principal objetivo de la investigación de Coela y Tarquí fue la cuantificación, evaluación y descripción de la demanda de los recursos hídricos aplicados al riego a nivel parcelario, debido a que no se conoce si las láminas aplicadas se encuentran por encima o por debajo de los requerimientos reales del cultivo, si su manejo en la aplicación presenta eficiencias aceptables, o si está influenciada por la organización y gestión del riego. El objetivo de la investigación se cumplió utilizando la metodología de muestreo de suelos y agua, para determinar las características fisicoquímicas de los mismos; la determinación de la dinámica del agua en el suelo se realizó con mediciones de humedad, pruebas de infiltración y una estimación del balance hídrico parcelario.

El análisis fisicoquímico del agua mostró un contenido de baja salinidad, boro y metales pesados (plomo y arsénico) por lo que no existe restricción en su uso para riego.

Respecto al grado de almacenamiento de humedad en el suelo, el autor observó que éste existe un almacenamiento durante varios meses en estudio (agosto-septiembre, diciembre-enero), sin embargo, el resto de los meses presentan un grado de déficit, afectando directamente los rendimientos de los cultivos.

Vieira *et al.*, en el 2014 desarrolló el estudio de “Water storage variability in a vineyard soil in the southern highlands of Santa Catarina State” en el cual se evaluó la variabilidad espacio-temporal de almacenamiento de agua en un suelo Cambisol presente en viñedos con la varietal Cabernet Sauvignon, de manera que la distribución de la humedad del suelo se analizó durante el ciclo de crecimiento del cultivo. El estudio mostró un grado alto de complejidad, ya que la presencia de humedad varía espacial y horizontalmente, además que cambia con respecto a la profundidad del suelo, lo anterior debido al tamaño y tipo de partícula de suelo, a la estructura del mismo, al contenido de materia orgánica, al paisaje y la pendiente del terreno.

Para realizar la evaluación espacial y temporal de la humedad en suelo, se extrajeron muestras de suelo a lo largo de 17 colecciones semanales de una profundidad de 0 a 30 cm por duplicado. Se realizó la perforación del suelo con el uso de la barrena helicoidal y la extracción de las muestras se realizó por duplicado con el uso de anillos metálicos, seguidamente se estudió la humedad del suelo en punto de marchitez permanente, humedad volumétrica, humedad gravimétrica y el almacenamiento del agua en el perfil. Una vez obtenidos los valores de las variables de interés se realizaron estadísticas descriptivas, geoestadísticas, correlaciones y evaluaciones de estabilidad temporal de almacenamiento del agua en el suelo.

El resultado de las estadísticas mostró que a pesar de que el suelo está catalogado como Cambisol, existen condiciones propias de cada zona de estudio, ya que se encontró una variabilidad en el almacenamiento de la humedad en el suelo, con valores desde 25 mm hasta 117 mm.

Respecto al análisis geoestadístico, los datos presentaron un mejor ajuste al modelo de Gauss, y la variabilidad en el almacenamiento de agua en el suelo se atribuye a la pendiente de la zona en estudio y a la profundidad de los perfiles, mismos que favorecen la escorrentía y drenaje, siendo procesos que influyen en el almacenamiento del recurso hídrico.

Durante el periodo de seca se encontró un menor grado de reserva de humedad en suelo con respecto al periodo de lluvia, mientras que regiones con una profundidad efectiva menor a 0.30 m presentaron un mínimo de almacenamiento hídrico y conforme aumentó la profundidad efectiva el grado de almacenamiento incrementó paulatinamente.

La temporalidad del almacenamiento de los periodos en estudio 2008/2009 y 2009/2010 mostraron una diferencia de al menos 30 mm de mayor captación de humedad en el segundo periodo en estudio, lo anterior se atribuyó a la escasez de lluvias en el primer periodo de análisis por lo que no hubo un considerable periodo de recarga de humedad en el suelo, sin embargo, la investigación demostró una estabilidad y comportamiento similar en la retención de humedad en el patrón espacial en el suelo en ambos periodos de estudio.

Glavan, Cvejic, Tratnik y Pintar en el 2013 trabajaron en la investigación “Geoespatial Analysis of Water Resources for Sustainable Agricultural Water Use in Slovenia”, cuyo desarrollo se estableció debido a la necesidad de simular la variabilidad de la disponibilidad del recurso hídrico a largo plazo y como ésta influye directamente en la productividad del sector agrícola. Eslovenia ha experimentado sequías periódicas de diferentes intensidades en diversas zonas del país, por consiguiente, los costos totales dirigidos al sector agrícola incrementan, ya que se invierte un mayor porcentaje en la eliminación de las consecuencias y la prevención de la sequía del sector productivo. La inversión en las correcciones del estado hídrico de la zona productiva es preocupante para el país, porque Eslovenia es un país rico en agua al presentar una precipitación de 800 a 3,000 mm anuales, misma que se ha reducido en los periodos de análisis. A partir de la necesidad de visualizar la problemática, el Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente de Eslovenia, solicitó un primer proyecto que se basó en la determinación de la cantidad de agua actual potencialmente disponible para uso en la agricultura, y un segundo proyecto enfocado a la proyección de la necesidad hídrica de los cultivos y si la oferta hídrica cubre su demanda.

Para llevar a cabo el primer proyecto, los autores recopilaron información de diversas fuentes de datos que alimentaron a la base utilizada para el análisis espacial. Se crearon mapas a partir de la tabulación de los datos con clases de usos y tipo de suelo, escorrentías, percolación, agua subterránea y agua almacenada en el perfil de suelo. También se utilizaron datos que incluían red fluvial, caudal de ríos, extracción de agua, agua disponible y flujo ecológico de los cauces de agua superficial, además, se incluyeron costos de drenajes, riegos, perforación y extracción. Para llevar a cabo todos los análisis geoespaciales se trabajó en el Software ArcGis versión 9.3.

Los autores identificaron 18 depósitos de agua tentativos para su colección y distribución hacia las zonas agrícolas, sin embargo, solo se lograría cubrir el 30% de las zonas agrícolas.

Respecto a las zonas de agua subterránea se identificaron tres categorías de acceso, fácil, mediano y difícil para la perforación de pozos; las zonas de fácil acceso y con precio más bajo equivalen a menos del 10% del territorio nacional con un 100% de disponibilidad de agua para su extracción.

Para realizar el segundo proyecto, los autores determinaron la necesidad hídrica de todos los cultivos en producción y estimaron el caudal de riego por goteo y aspersión que se necesita para abastecer la demanda. Una vez conociendo los valores totales de la demanda hídrica de los cultivos se correlacionaron con la presencia y distribución espacial del agua cuantificada en el primer proyecto en estudio, seguidamente a la correlación, se establecieron clases de riesgo a la sequía para toda la zona de interés.

Los autores determinaron 6 clases de riesgo, desde un riesgo muy alto hasta ningún riesgo de sequía. El análisis potencial mostró que el 34% de la zona de estudio presentó un riesgo muy alto a la sequía, el 50% se encontró bajo un riesgo alto, el 15% está en zona de riesgo mediano y solo el 1% presentó un riesgo bajo a la sequía.

En el 2011 Arteaga *et al.*, desarrolló el “Programa CROPWAT para la planeación y manejo del recurso hídrico”, el método CROPWAT logra determinar la evapotranspiración de referencia, precipitación efectiva y necesidades de riego. Utilizando las variables anteriormente mencionadas, el modelo logra simular una programación de riego con una lámina, frecuencia y aplicación del recurso hídrico para diversos cultivos producidos en el Golfo de México, basándose en un balance diario de humedad del suelo, condiciones de manejo del riego respecto al patrón de cultivo y la programación del riego respecto al desarrollo fenológico del cultivo. En el 2011 se registraron más de 6.1 millones de hectáreas agrícolas y poco más del 90% utilizaban un sistema de riego por gravedad, de igual manera éste sistema presenta una de las más bajas eficiencias en el uso del agua, por lo tanto, es un punto crítico e importante de estudio para el sector agrícola. Por lo cual es transcendental contar con tecnología que permita la administración y manejo del recurso hídrico en el riego, por lo que la propuesta del método CROPWAT satisface el objetivo de minimizar las pérdidas en el riego y aplicar el regadío de manera sustentable.

El autor realizó simulaciones con el programa CROPWAT para trabajar la calendarización y aplicación de riego de manera eficiente.

Para correr el modelo se necesitaron datos climatológicos de la estación meteorológica, además de información de las etapas fenológicas del cultivo, altura de planta, profundidad del cultivo, coeficientes del cultivo, y estadísticas de rendimientos, además de información de los tipos de suelo presentes en la zona de producción tales como textura, humedad, profundidad e infiltración.

El modelo utilizado permite programar riegos bajo diferentes opciones de frecuencia respecto al tipo de suelo, para así definir la mejor opción de riego. El programa de cómputo CROPWAT demostró ser una herramienta útil para las estimaciones y cálculos de las láminas y frecuencias de riego, ya que determinar en el presente estudio diversos modelos que se adaptaron a la necesidad hídrica de los cultivos en estudio y mostraron rendimientos por encima del 85%.

Sarabia, Cisneros, Aceves, Durán y Castro en el 2011, desarrollaron la investigación “Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del Valles de San Luis Potosí, México” en donde su objetivo principal fue analizar la calidad del agua de riego del Valle de San Luis Potosí, proveniente del acuífero somero y profundo, y su impacto de ésta en suelos agrícolas. El objetivo de los autores fue propuesto debido a que existe la hipótesis de que, el recurso hídrico del acuífero somero está contaminado principalmente por las descargas urbanas que se conducen sobre canales de riego a cielo abierto, además que diversos estudios científicos demuestran que en el acuífero profundo del Valle de San Luis Potosí presenta una contaminación natural por la presencia del ion fluoruro, esto debido a la litología y mineralización de la zona. Ambos tipos de contaminación de las fuentes hídricas pueden influir en la calidad y rendimientos de la producción agrícola.

La metodología utilizada en el desarrollo de la investigación se basó en un muestreo de suelo, agua y biomasa de cultivos, seguidamente de un análisis fisicoquímico para conocer las variables en estudio como, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, micro y macro nutrientes, flúor y metales pesados.

Los resultados de la investigación mostraron que el agua del acuífero somero se encontraba contaminada con coliformes fecales, sulfatos y cloruros, sobrepasando los límites para uso agrícola, además el contenido de sales en el agua fue catalogado como alto con una restricción para uso de riego en cultivos con baja tolerancia a la salinidad. Los suelos de la zona de estudio se mostraron como suelos no salinos a pesar que la salinidad de las aguas de riego es alta.

Respecto al estudio de metales pesados, no encontraron concentraciones que sobrepasaran los límites máximos permisibles en suelo y cultivos especies agrícolas en estudio.

PROBLEMÁTICA

Estado del arte de la problemática: Metodologías de distribución espacial en el manejo del recurso hídrico en zonas productoras de vid a nivel internacional.

La distribución espacial permite visualizar, analiza y entender los fenómenos de interés y su comportamiento en un momento específico de estudio o en su evolución temporal, lo anterior se logra con el monitoreo de los fenómenos a través de metodologías que involucran la percepción remota (Sobrino, 2000; Chuvieco, 2002).

El manejo del recurso hídrico en las zonas productoras de vid es de suma importancia, ya que el agua es un factor importante y determinante en la producción del fruto y afecta directamente la calidad del producto final, “el vino”. Un exceso de agua en la zona productiva induce un desarrollo vegetativo en exceso, mientras que un estrés hídrico de alta intensidad disminuye el desarrollo foliar, de manera que ambas condiciones inducen un efecto negativo sobre el fruto (Möller *et al.*, 2006). Las metodologías que contribuyen a completar y facilitar los análisis de la distribución espacial que se relacionan con el manejo del recurso hídrico en las zonas agrícolas son los índices de vegetación, índices de humedad e índices de estrés hídrico de los cultivos.

El presente estado del arte muestra una recopilación de metodologías aplicadas en el marco de la distribución espacial en el manejo del recurso hídrico en zonas productoras de vid a nivel internacional.

La investigación “Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learnign” fue trabajada por Gutiérrez *et al.*, en el 2017 y publicada en febrero del 2018, cuyo objetivo principal fue analizar los valores de estrés hídrico de la plantación, obtenidos a partir del uso de imágenes térmicas y parámetros del estado del agua en la planta, y generar un modelo de predicción que permitiera estimar el estrés y contribuir a la planeación del riego de precisión en la zona de interés.

El estudio constó de 3 tratamientos (incluyendo al testigo), el primero recibió una irrigación completa con un caudal de 6 L/h, el segundo tratamiento se trabajó con un riego moderado (3 L/h) y al tercer tratamiento no se le aplicó ningún riego durante todo el tiempo del experimento. El diseño experimental se realizó durante 7 semanas (junio-septiembre), y se determinaron cuatro repeticiones compuestas de 25 plantas cada una.

Para la toma de las imágenes térmicas los autores trabajaron con una cámara térmica, colocada en la parte delantera de un vehículo todo terreno a 1 metro de distancia del suelo, y la cámara se conectó a una computadora industrial. La cámara captó la imagen del dosel del cultivo de ambos lados a una distancia de 1.2 m y a una velocidad de 5 Km/h. La temperatura de referencia, del límite máximo y mínimo, se obtuvo utilizando un evaposensor durante todos los días de la medición, una vez que se conocieron las variables en estudio se desarrolló el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI).

Para la determinación del agua presente en la planta, se utilizó una bomba de presión Scholander y se midió el potencial hídrico del tallo de 5 plantas por repetición para cada uno de los tratamientos en estudio, además se consideraron parámetros de campo como temperatura del aire, Déficit de Presión de Vapor (DPV) y Humedad Relativa (HR).

El algoritmo de predicción que trabajaron los autores fue producto de la combinación de las variables analizadas utilizando modelos de regresión.

Los resultados obtenidos respecto al potencial hídrico del tallo mostraron diferencias significativas entre los tratamientos de interés a lo largo de las 7 semanas de estudio. Cabe rescatar que el tratamiento 3 mostró un alto nivel de estrés hídrico cuando las plantas presentaban un valor de -2.05 MPa, el tratamiento 2 presentó un estrés controlado con valores de potencial hídrico del tallo de -1.05 MPa, mientras que cuando se presentaron valores de -0.40 MPa (tratamiento 1) no hubo ningún grado de estrés hídrico en las plantas.

Para la variable de temperatura del dosel no se encontraron diferencias significativas en los primeros tres días en estudio, sin embargo, conforme pasó el tiempo se presentaron diferencias, de al menos 2 °C entre los tratamientos.

Las estadísticas para los modelos construidos presentaron coeficientes de R^2 por encima de 0.65 y el valor más alto fue de R^2 0.83, mismo modelo que fue utilizado para la predicción del estrés hídrico para los bloques en estudio, obteniendo valores de coeficiente R^2 por encima de 0.55, demostrando que los modelos propuestos fueron capaces de predecir el estado hídrico de la vegetación. El coeficiente estadístico de determinación conocido como R^2 es usado en modelos de regresión con el objetivo principal de obtener un valor de confiabilidad de la predicción de resultados, mismo que refleja el mejor ajuste de un modelo a las variables de interés (InfoStat, 2016).

Bellvert, *et al.*, en el 2014 desarrolló el estudio “Mapping crop water stress index in a Pinot-noir vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle” utilizando el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo para mapear la variabilidad espacial de la deficiencia hídrica de la zona de estudio. El CWSI se trabajó a partir de imágenes térmicas de alta resolución tomadas con un sensor desde un vehículo aéreo no tripulado y se complementaron con temperaturas de la cubierta del dosel. Los resultados obtenidos del CWSI se correlacionaron con valores de potencial hídrico de la hoja, medidos con una cámara de presión Scholander, encontrando valores de R^2 por encima de 0.70. Los autores encontraron una relación positiva ($R^2 = 0.71$) entre la diferencia de la temperatura del dosel menos la temperatura del ambiente y el potencial hídrico de la hoja ($T_c - T_a$), lo que demostró que conforme incrementa la temperatura de la hoja el potencial hídrico se hace más negativo, presentando un mayor grado de estrés hídrico. También se mostraron resultados respecto a la relación entre la $T_c - T_a$ y el DPV ($R^2 = 1$), encontrando una relación lineal positiva. Los autores concluyeron que las vides bien regadas mostraron valores de potencial hídrico de -0.50 a -0.65 con valores de CWSI menores a 0.2, por lo tanto, no presentaban ningún grado de estrés hídrico, mientras que vides con potencial hídrico foliar por debajo de -1.50 mostraron valores de CWSI por encima de 0.6, presentando un alto grado de estrés hídrico.

Echeverría, 2010 y Rodríguez, 2009, trabajaron en la determinación de Índices de Vegetación, como Índice Diferencial de Vegetación Normalizada, Cociente Simple (SR), Índice de las bandas de absorción de agua (WI) y el Índice de Sanidad Celular de la Vegetación (PCD), con el uso de la teledetección en imágenes satelitales, relacionando el grado de vigorosidad de zonas productivas de vid con el manejo del recurso hídrico.

Los autores identificaron que las zonas con mayor grado de vigorosidad presentaban un menor estrés hídrico, mientras que plantas con un vigor bajo mostraban una deficiencia hídrica mayor, además realizaron mediciones de potencial xilemático y potencial hídrico de la planta utilizando una cámara de presión Scholander y los resultados se relacionaron con los índices de vegetación, encontrando un comportamiento y evolución similar a lo largo del tiempo de evaluación.

Vanino, Pulighe, Nino, De Michele, Falanga y D'Úrso, publicaron la investigación "Estimation of Evapotranspiration and Crop Coefficients of Tendone Vineyards Using Multi-Sensor Remote Sensing Data in a Mediterranean Environment" en el 2005. Su objetivo principal fue determinar la evapotranspiración del cultivo (ET_c), el coeficiente del cultivo (K_c), el Índice Diferencial de Vegetación Normalizada y el Índice del Área Foliar (LAI) de las etapas fenológicas principales de un viñedo y relacionarlas entre sí, con el objetivo de identificar un comportamiento simultáneo. Para la determinación de la evapotranspiración del cultivo se trabajó con la metodología propuesta por la FAO en el manual 56, seguidamente se determinaron los valores del K_c utilizando variables de la determinación de la ET_c e imágenes Landsat 8, el resto de las variables en estudio se trabajaron mediante percepción remota utilizando imágenes Landsat 8 y RapidEye. Los autores obtuvieron como resultado una tendencia con patrones relacionados entre las variables en estudio, en efecto, cuando la zona de interés mostró un índice del área foliar alto, los valores de NDVI y K_c se encontraban cercanos a 1 y los valores de evapotranspiración oscilaban entre 5 y 6 mm/ día, valores que en conjunto muestran un nulo grado de estrés hídrico, mientras que, cuando los valores de las variables en estudio se comportaron inversamente el grado de estrés hídrico era mayor.

HIPÓTESIS

El uso de la percepción remota con imágenes multiespectrales, índices de vegetación, humedad y estrés hídrico del cultivo permitirán estimar el grado de estrés hídrico de *Vitis vinifera* a lo largo de su ciclo vegetativo y reproductivo.

OBJETIVO GENERAL

Determinar el estrés hídrico de diferentes variedades de *Vitis vinifera* a partir de un modelo de distribución y monitoreo geoespacial con el uso de imágenes multiespectrales y un Vehículo Aéreo No Tripulado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar las variedades presentes en la zona de estudio con el fin de identificar las variables requeridas para el modelo de distribución espacial mediante verificación en campo.

Generar ortomosaicos de imágenes multiespectrales tomadas desde un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) en diferentes etapas de desarrollo del cultivo para identificar las condiciones in situ de la plantación y determinar el NDVI.

Interpretar mapas esquemáticos de la determinación de los índices NDVI, NDWI y CWSI, calculados a partir de imágenes multiespectrales y datos meteorológico-climáticos.

Calcular la variable de evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$), con el fin de identificar el estrés hídrico de manera convencional y geoespacial utilizando datos meteorológico-climáticos y un análisis geoestadístico.

METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en la presente investigación se describirá para cada uno de los capítulos que la conforman.

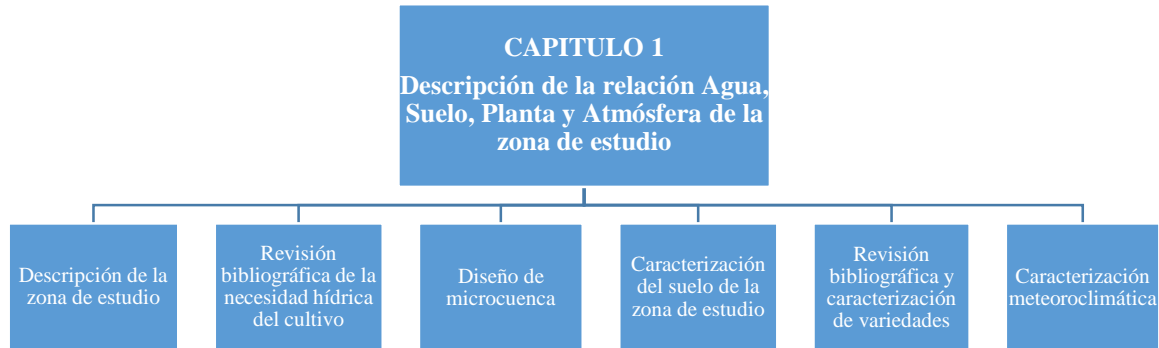


Ilustración 1. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 1.

La Ilustración 1 muestra la descripción de la metodología trabajada en el capítulo 1 “Descripción de la relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera de la zona de estudio”.

Como primera etapa se realizó una visita de reconocimiento de la zona de estudio, con el objetivo de identificar elementos descriptivos de la plantación de la zona como: número de variedades, densidad de la plantación, topografía, tipo de riego, entre otros. Seguidamente se hizo una descripción de la zona, tomando en cuenta el área productiva, la ubicación geográfica, la altitud, la región hidrológica y condiciones climáticas.

En la siguiente etapa se efectuó una revisión bibliográfica sobre la necesidad hídrica del cultivo en estudio y su distribución a lo largo de su desarrollo vegetativo y reproductivo.

Posteriormente, se diseñó la microcuena en donde se encuentra ubicada la zona productiva, con el objetivo de identificar cauces principales que puedan afectar o beneficiar el área productiva. Seguidamente se describió la tipología y topografía de la zona a partir de un análisis fisicoquímico de muestras de suelo tomadas en campo y analizadas con la Norma NOM-021-RECNAT-2000.

Consecutivamente en la cuarta etapa, se ejecutó una revisión bibliográfica y recorrido en campo para lograr integrar una caracterización de las variedades productivas y la determinación de su ciclo fonológico, de lo cual se analizaron variables como: vigor, porte, productividad, adaptación, resistencia, sensibilidad a plagas y enfermedades, y aptitudes para producción de vino.

Por último, se realizó una revisión bibliográfica para conocer las variables climáticas que determinan el apropiado desarrollo del cultivo. Una vez obtenidas las variables de interés se caracterizaron las condiciones meteoroclimáticas de la zona, utilizando la información de la estación meteorológica del INIFAP San Luis – del municipio de San Luis Potosí y el Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017.

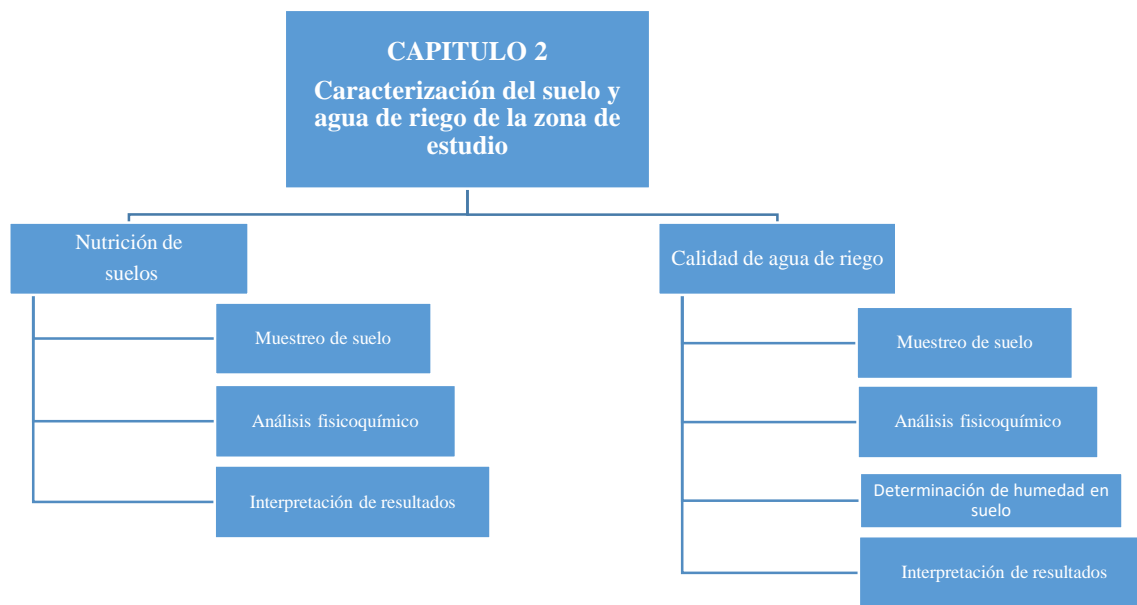


Ilustración 2. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 2.

La metodología desarrollada en el capítulo 2 “Caracterización del suelo y agua de riego de la zona de estudio”, consta de dos apartados: la determinación de la nutrición en suelos y la calidad de agua utilizada para el riego. Ambos apartados se trabajaron simultáneamente en el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Como primera acción se determinaron los puntos de muestreo de suelo para la posterior recolección de las muestras, se utilizó la metodología propuesta en la Norma NOM-021-RECNAT-2000. Simultáneamente se tomaron las muestras de agua de 1 toma de agua para cada una de las fincas en estudio. Una vez recolectadas las muestras en campo se trasladaron al laboratorio, donde se trabajaron los análisis para cada una de las muestras.

Después de una revisión bibliográfica se determinó desarrollar los análisis fisicoquímicos siguiendo las metodologías propuestas por la Norma NOM-021-RECNAT-2000 y complementadas con las metodologías utilizadas en el laboratorio anteriormente mencionado.

Seguidamente se realizó la interpretación de los resultados de los análisis de suelo obtenidos para cada una de las variables en estudio, de lo cual se efectuó un análisis geoestadístico y la generación de mapas esquemáticos que permitieron una interpretación georreferenciada.

Los resultados obtenidos en el análisis de calidad de agua de riego se interpretaron con las Directrices para las interpretaciones de la calidad del agua para el riego (Ayers y Westcot, 1994) y con el diagrama de clasificación de riesgo de sodicidad y salinidad (Richards, 1954). Por último, se analizaron los diferentes grados de humedad en suelo con el uso de un análisis geoestadístico y la generación de mapas esquemáticos georreferenciados.

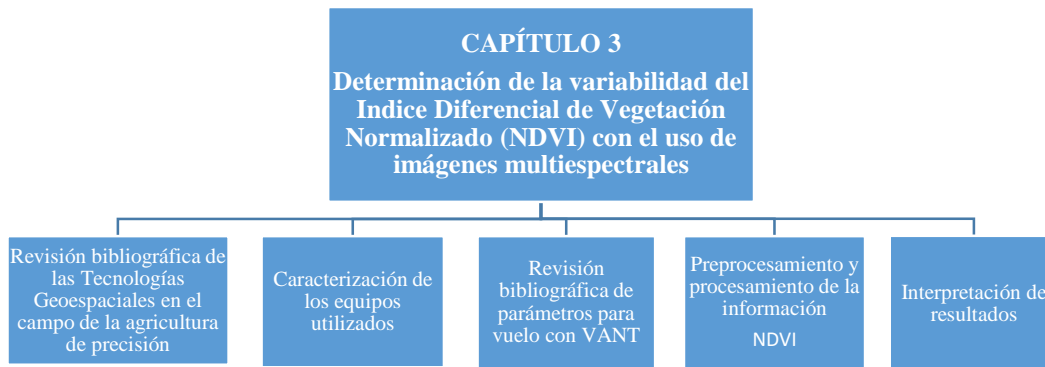


Ilustración 3. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 3.

El capítulo 3 “Determinación de la variabilidad del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) con el uso de imágenes multiespectrales” se trabajó con base a la metodología descrita en la Ilustración 3 utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) y sensores multiespectrales.

En una primera etapa se realizó una revisión bibliográfica de las tecnologías geoespaciales utilizadas en el campo de la agricultura de precisión, entre ellas el uso de satélites espaciales y sensores utilizados en vuelos con VANT para el análisis de procesos de restitución de imágenes.

Seguidamente se desarrolló una caracterización de los equipos utilizados en la planeación y ejecución del vuelo con un VANT en la zona de estudio.

Una vez descritos los equipos, se ejecutó una revisión de literatura sobre los parámetros que deben de considerarse previo y durante la ejecución del vuelo para cumplir con éxito la labor y obtener información confiable de la zona de estudio.

Posteriormente se planificaron las fechas de vuelo de la zona de estudio, las cuales se determinaron a partir de las condiciones climáticas y del ciclo vegetativo y reproductivo de la vid. Consecutivamente a la planeación de los vuelos y a la determinación de las fechas se ejecutaron cada uno de los vuelos planeados concluyendo satisfactoriamente.

El preprocesamiento de la información captada en campo por los sensores utilizados, consta de la modificación de archivos, georreferenciación individual de cada imagen, corrección radiométrica, corrección atmosférica, generación de ortomosaicos y la verificación de coordenadas de cada uno de los ortomosaicos generados. El preprocesamiento se trabajó en diversos software: FIJI, MAPIR y PIX4Dmapper. Consecutivo al preprocesamiento se realizó el procesamiento de la información, trabajando en la extensión ArcMap 10.2 del software ArcGIS. Se trabajó el Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (Tucker, 1979) para cada una de las imágenes en estudio.

Por último, se desarrollaron mapas esquemáticos georreferenciados para cada una de las fechas en estudio, con el objetivo de ofrecer una interpretación de distribución espacial con respecto a las condiciones fisicoquímicas del suelo y las variedades productivas de la zona de estudio.

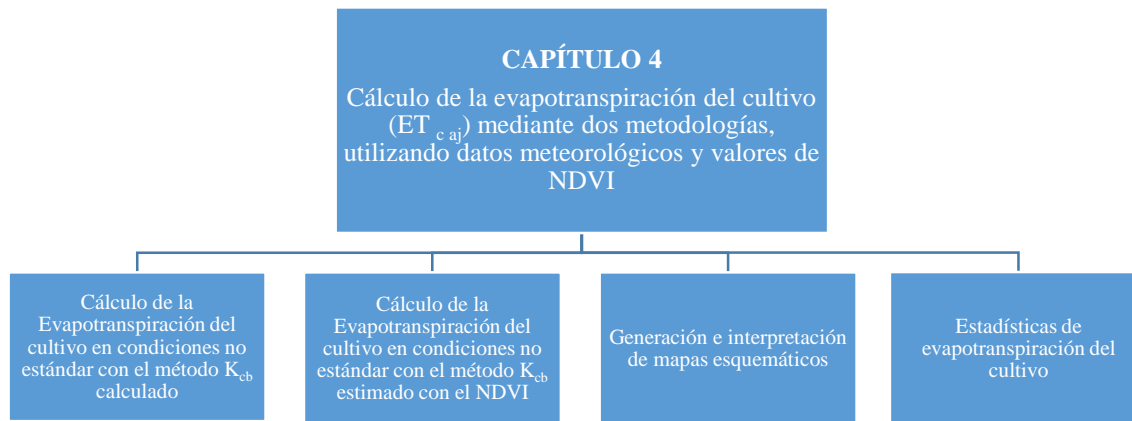


Ilustración 4. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 4.

La Ilustración 4 describe la metodología desarrollada en el capítulo 4 “Cálculo de la evapotranspiración del cultivo ($ET_{c_{aj}}$) mediante dos metodologías, utilizando datos meteorológicos y valores de NDVI”.

El capítulo 4 se enfocó en la determinación de la evapotranspiración para cada uno de los bloques de las variedades de vid en producción en la zona en estudio. Se trabajó utilizando dos metodologías; la primera, es la estimación de la evapotranspiración en las fincas en estudio a partir del coeficiente basal del cultivo calculado a partir de la metodología propuesta por la FAO en el manual #56, la cual se basa en coeficientes basales establecidos para el cultivo en sus diferentes etapas de desarrollo; la segunda metodología trabajada para la estimación de la evapotranspiración se basa en el cálculo del coeficiente basal del cultivo a partir de la información trabajada en el capítulo 3, el NDVI.

Para ambos métodos desarrollados se determinó la variable de evapotranspiración de un cultivo de referencia, un coeficiente de estrés hídrico del cultivo, un coeficiente basal del cultivo y un coeficiente de evaporación del suelo.

Una vez calculado el grado de evapotranspiración para cada uno de los métodos en estudio se desarrollaron mapas esquemáticos georreferenciados y se realizó su interpretación, misma que se basa en las variedades productivas, en el estado vegetativo y reproductivo de la vid, en las condiciones climáticas presentes en los días de estudio y el estado hídrico del suelo.

Posteriormente a la generación e interpretación de los mapas esquemáticos, se desarrollaron una serie de estadísticas de la evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar que permitieron estudiar el comportamiento de la evapotranspiración a lo largo del tiempo y su relación con el NDVI.



Ilustración 5. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 5.

El capítulo 5 lleva por título “Determinación de la variabilidad del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) con el uso de imágenes multiespectrales” y se enfoca en la determinación de la variabilidad de la humedad del suelo y de la planta a lo largo del tiempo y se trabajó a partir de la metodología descrita en la Ilustración 5.

En una primera etapa se realizó una revisión bibliográfica que engloba el uso de imágenes satelitales y procesos de teledetección para la determinación de la humedad en el suelo y en la vegetación, las ventajas de su uso y las correcciones que deben de realizarse previamente al procesamiento de la información.

Seguidamente se ejecutó la descarga de las imágenes multiespectrales LANDSAT-8 OLI, y una vez descargadas las imágenes se les dio un preprocesamiento, el cual incluye, una corrección radiométrica, corrección atmosférica y un remuestreo de pixel a 1 m.

Posteriormente a las correcciones desarrolladas a cada imagen se realizó el procesamiento, el cual constó de la determinación del Índice Diferencial de Agua Normalizado (Gao, 1996), trabajado en el módulo Raster Calculator en la extensión ArcMap 10.2 de ArcGIS.

Una vez determinado el NDWI para cada una de las fechas en estudio se generaron mapas esquemáticos georreferenciados para consecutivamente interpretarlos con respecto a las condiciones climáticas presentes en la fecha de la toma de información, la etapa vegetativa y reproductiva de las variedades en estudio y al estado hídrico del suelo.

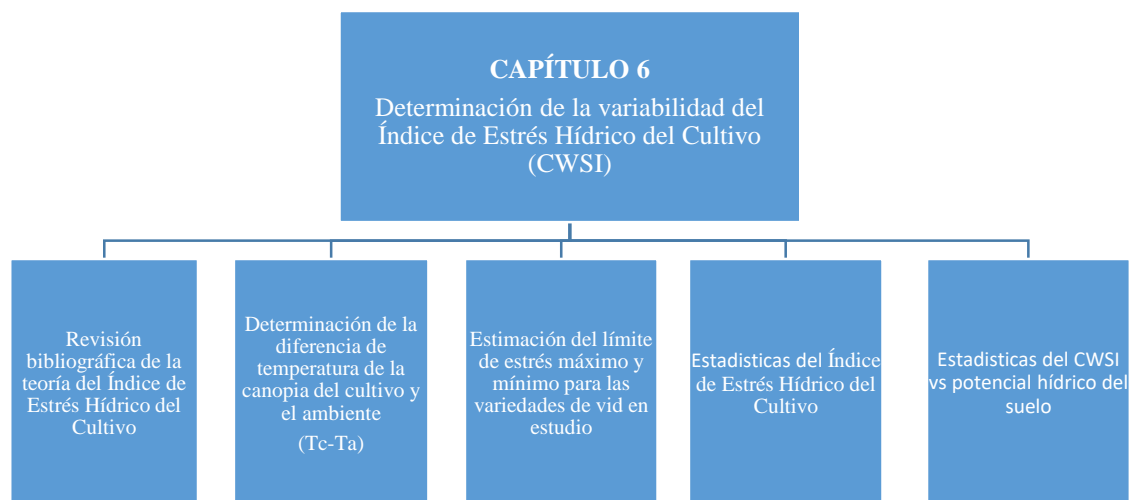


Ilustración 6. Descripción de la metodología desarrollada en el capítulo 6.

El último capítulo desarrollado en la presente investigación se titula “Determinación de la variabilidad del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo” y se trabajó siguiendo la metodología descrita en la Ilustración 6.

Inicialmente se realizó una revisión de literatura sobre la teoría del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (Jackson *et al.*, 1981; Idso, 1982), posteriormente se prosiguió en la determinación de la diferencia de temperatura entre la canopia del cultivo y la temperatura del ambiente, seguidamente se trabajó con la estimación del límite máximo y mínimo de estrés que puede presentar cada una de las variedades en estudio, así mismo se trabajó con la metodología propuesta por Idso en 1982, la cual se basa en un modelo empírico con base a un balance de energía con respecto al DPV.

Una vez determinadas las variables de interés se desarrollaron estadísticas que permitieron conocer el ajuste del modelo, su viabilidad en el uso para la determinación del CWSI y las ecuaciones que determinan el modelo de CWSI a partir del déficit de presión de vapor.

Seguidamente a la obtención de las ecuaciones determinadas en las estadísticas anteriormente mencionadas, se concretó la determinación del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo para cada una de las variedades productivas y posteriormente se graficaron para analizar el comportamiento del estrés hídrico del cultivo a lo largo de un año de estudio.

Concluido el análisis del CWSI se relacionó la variable de interés con el potencial hídrico del suelo, mismo que se midió en campo con el uso del sensor Watermark digital de medición de humedad del suelo con lecturas instantáneas durante un mes y medio (10 de abril - 25 de mayo 2018).

SINOPSIS

A lo largo del trabajo de investigación “Estimación del estrés hídrico de *Vitis vinifera* mediante percepción remota en zona de viñedos del municipio de San Luis Potosí” el lector encontrará 6 capítulos en estudio con el contenido que se describe a continuación.

Capítulo 1. “Descripción de la relación agua, suelo, planta y atmósfera de la zona de estudio.” En el primer capítulo se da a conocer la necesidad hídrica del cultivo a lo largo de su ciclo vegetativo y reproductivo, seguidamente se describe a grandes rasgos el tipo de suelo y la topografía de la zona productiva, además, se presenta una caracterización de las variedades de *Vitis vinifera* en estudio y, por último, el lector encontrará una descripción de las condiciones meteoro-climáticas presentes en zona de viñedos del municipio de San Luis Potosí.

Capítulo 2. “Caracterización del suelo y agua de riego de la zona de estudio.”

El capítulo 2 muestra las metodologías utilizadas para la determinación de las condiciones fisicoquímicas del suelo y del agua de riego presente en la zona de estudio. Los resultados obtenidos de la nutrición de los suelos se muestran en mapas esquemáticos con distribución espacial, además, se discute la caracterización de la calidad del agua de riego utilizada respecto a las directrices de calidad propuestas por Ayers y Westcot, (1994) y el diagrama de clasificación de Richards, (1954).

Capítulo 3. “Determinación de la variabilidad del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI) con el uso de imágenes multiespectrales.”

El presente capítulo se trabajó utilizando imágenes multiespectrales tomadas desde un de Vehículo Aéreos No Tripulado, por lo tanto, se describen las características específicas de los sensores y el VANT utilizados, también se muestra una revisión bibliográfica de las tecnologías geoespaciales en el campo de la agricultura de precisión. Seguidamente el lector encontrará la descripción de las etapas de planeación y ejecución de los vuelos para restitución de las imágenes. Por último, se presentan la metodología del NDVI y los resultados obtenidos se discuten a partir de la generación de mapas esquemáticos.

Capítulo 4. “Cálculo de la evapotranspiración del cultivo ($ET_{c_{aj}}$) mediante dos metodologías, utilizando datos meteorológicos y valores de NDVI.”

En este capítulo se realiza una descripción en el marco del cálculo de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico ($ET_{c_{aj}}$) y se presentan las variables de interés, así como las ecuaciones utilizadas en las dos metodologías trabajadas para su determinación. Además, se muestran los resultados obtenidos de la evapotranspiración del cultivo de manera esquemática con mapas georreferenciados para cada una de las metodologías aplicadas y se complementa el capítulo con estadísticas de evapotranspiración del cultivo a lo largo del tiempo de estudio.

Capítulo 5. “Determinación de la variabilidad del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) con el uso de imágenes multiespectrales.”

Para la determinación del NDWI se trabajó con imágenes satelitales multiespectrales, así que, en este capítulo se encontrará la descripción de las imágenes utilizadas y de las metodologías que se siguieron para el preprocesamiento y procesamiento de la información de las mismas. El producto final del capítulo es la generación de mapas esquemáticos correctamente georreferenciados, su interpretación y discusión.

Capítulo 6. “Determinación de la variabilidad del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI).”

Por último, en el capítulo seis se muestra la teoría del modelo CWSI y la metodología utilizada para su determinación a partir de datos meteorológico-climáticos y variables de interés. Seguidamente se encontrarán estadísticas de distribución del estrés hídrico a lo largo del ciclo vegetativo para cada una de las variedades de *Vitis vinifera* en estudio. Para concluir se presenta la relación que existe entre el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo y el potencial hídrico del suelo.

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA, SUELO, PLANTA Y ATMÓSFERA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

1.1 Relación Agua, Suelo, Planta y Atmósfera

El concepto de agua, suelo, planta y atmósfera (RASPA) analiza la relación y el flujo del agua a través de la planta como un proceso dinámico que comienza desde el reservorio y fuente (suelo), hasta el final del recorrido, en la atmósfera (Gil *et al.*, 2005).

El agua, elemento esencial que gobierna los procesos biológicos sobre la tierra, es una sustancia tan familiar, que sus sorprendentes propiedades suelen parecer obvias. Su distribución y disponibilidad asociadas con la atmósfera, la naturaleza y el suelo, definen la calidad de la vida y de las actividades productivas que el hombre desarrolla para satisfacer las necesidades de alimento, vestido y vivienda (IICA, 1983).

Respecto a la producción de alimentos agrícolas, la relación **agua-planta** es fundamental, el agua es el principal constituyente de las plantas y cumple con funciones vitales en los procesos fisiológicos, como solvente provee el medio de movimiento para moléculas dentro y entre las células, además de influir en la estructura molecular y propiedades de las proteínas, membranas y otros constituyentes celulares (López, 2000), además, permite la absorción de nutrientes a través de la dilución de las sales en el agua presente en el suelo (el cual actúa como reservorio del recurso) y es responsable de la propiedad de adhesión en la planta, logra controlar el mecanismo de apertura y cierre estomático permitiendo la regulación térmica de los tejidos, manteniendo la turgencia celular y rigidez de las estructuras (Azcón y Talón, 2000). De todos los recursos necesarios para el apropiado funcionamiento de la planta, el agua es el factor determinante, además del más limitante en la productividad agrícola.

El suelo, reservorio del recurso hídrico por su capacidad de retención de humedad a partir de su carácter granular y coloidal (**agua-suelo**); la propiedad de retención de humedad es de gran importancia para el desarrollo apropiado del cultivo, ya que además de dar sostén y proveer de nutrientes a una planta (**suelo-planta**), brinda el recurso hídrico a su sistema, sin embargo, el comportamiento del agua en el suelo es el problema más importante de los inconvenientes físicos, el contenido y la disponibilidad del recurso son los puntos más relevantes (López, 2000). El reservorio puede medirse en términos de la cantidad presente (contenido volumétrico y/o gravimétrico) y con el estado energético o potencial hídrico (Rundell y Jarrell, 1991). En el año 2000, López establece que el movimiento del agua en el suelo está en respuesta al gradiente de potencial hídrico (diferencia de humedad) con relación a la composición del tipo de suelo y a los movimientos de infiltración y drenaje.

El tipo de suelo, el contenido de materia orgánica, la granulometría y la estructura, son los factores determinantes en la retención de agua en el suelo, además de ser de interés para el desarrollo radicular de las plantas (IICA, 1983).

El modelo RASPA presenta dos extremos en el flujo del agua a través de la planta, el primero va desde el reservorio suelo y el último se presenta al final del proceso, en la atmósfera (**suelo-atmósfera**). La necesidad fisiológica de una planta a absorber agua y transpirarla para su regulación térmica, da pie al mecanismo continuo de relaciones hídricas en un sistema, por lo que las condiciones de la atmósfera contribuyen a establecer un equilibrio líquido – vapor; si la atmósfera no presenta las condiciones ideales de humedad relativa (HR), viento, punto de rocío, temperatura y déficit de presión de vapor, la condición de la transpiración de la planta se ve afectada directamente, ya que la planta es obligada a cerrar los estomas por influencia de la atmósfera, aunado a esto la condición de humedad en el suelo es fundamental, ya que existe un equilibrio entre el gradiente de presión ejercido en la entrada y en la salida del agua a través de la planta (Gil *et al.*, 2005).

Ante la carencia de agua y su disponibilidad para la producción agrícola como una actividad económica de alto consumo del recurso, el modelo RASPA muestra las cuatro variables indispensables para lograr una eficiencia en el uso del agua y la obtención de un producto de primera calidad, ya que una variedad por sí sola no es suficiente para producir eficientemente y se necesita de la interacción con un suelo apropiado, que de soporte y nutrición, además, que funja como reservorio de agua y permita a la planta disponer de ella cuando se necesite y de una atmósfera apropiada para su desarrollo que contribuya a mantener un equilibrio líquido-vapor.

1.2 Descripción de la zona en estudio

El presente trabajo de investigación se desarrolló en viñedos ubicados en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez perteneciente al estado de San Luis Potosí, México.

Se analizaron un total de 11 hectáreas productivas divididas en dos zonas del municipio, para fines prácticos se conocerá como “Finca 1” a la zona ubicada en las coordenadas Lat: 22° 13’ 850’’ N y Long: 100° 55’ 414’’ O, la cual cuenta con un área activa de 10 hectáreas y la segunda zona de estudio se encuentra en Lat: 22° 13’ 119’’ N y Long: 100° 56’ 220’’ O, la cual se conocerá como “Finca 2” cuya área es de 1 hectárea, ambas se encuentran a una altitud aproximada de 1845 msnm.

Las dos zonas de estudio se ubican en la región hidrológica El Salado con clave RH37, en la cuenca y subcuenca nombrada Presa de San José de tipo exorreica, identificada en la plataforma SIATL 3.1 del INEGI.

La temperatura media anual en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez es de 17.7 °C en el periodo de 1945 a 2015 y se registra una precipitación media anual de 326.2 mm (1961 a 2015), según INEGI en el 2017.

1.3 Descripción del agua de riego utilizada en la zona de estudio

La disponibilidad de la humedad del suelo es uno de los factores determinantes para la obtención de altos rendimientos y calidad de los cultivos. Gran parte de la fisiología vegetal está asociada con éste recurso, ya que muchas de sus funciones se encuentran determinadas a partir de las propiedades del agua y los solutos disueltos en ella (Ayers, 1989).

El agua de riego mantiene un amplio rango de variación respecto a su calidad, la cual depende del tipo de agua y la cantidad de sales disueltas, los solutos presentes en el agua se aplican al momento del riego y permanecen en el suelo, afectando o beneficiando al cultivo según el tipo de sales presentes. La calidad del agua de riego utilizada en el sistema de producción se evalúa a partir de la gravedad de los problemas que pueden surgir durante su periodo de uso a largo plazo (Ayers, 1989).

Gran parte de los productores agrícolas del municipio de Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P, ponen en práctica el riego, con el objetivo de cumplir con la demanda requerida de los cultivos en producción, el agua es extraída en su mayoría de pozo de acuífero profundo y somero del Valle de San Luis Potosí.

La necesidad hídrica que demanda el cultivo de la vid se encuentra en función de las condiciones ambientales de la zona, de la topografía, el tipo de suelo y de las variedades en producción, no obstante, varios autores proponen niveles mínimos de requerimiento hídrico que van desde los 170 mm hasta los 600 mm anuales. La necesidad hídrica es requerida en las 4 etapas más importantes del desarrollo de la vid (reposo invernal, brotación, floración, cuajado y envero), sin embargo, durante el periodo de cuajado y envero es donde el cultivo demanda más del 50% del recurso hídrico (Ferreira *et al.*, 2002; García *et al.*, 2017; Guzmán *et al.*, 2008; Pascual, 1995).

El riego contribuye el crecimiento de la zona foliar y desarrollo radicular del cultivo de vid, además de formar parte del ciclo de nutrición mineral y un alargamiento del ciclo vegetativo, cosechas más abundantes también van de la mano con los ciclos de riego, sin embargo, se presentan problemas cuando el riego sobrepasa la demanda del cultivo, tales como una menor calidad del producto final al minimizar las graduaciones alcohólicas del vino (Pascual y Cabrerizo, 1995), es por lo anterior que es importante determinar las zonas y fechas idóneas para el riego, sin afectar la calidad del fruto.

En el caso de la zona de estudio, el viñedo cuenta con un sistema de riego por goteo con goteros dobles (5.0 cm de distancia) con una distancia de 45.0 cm entre gotero simple, el agua utilizada es extraída de pozo y su riego es inmediato para la plantación en la “Finca 1”; mientras que para la “Finca 2”, primeramente se hace la extracción del pozo y se lleva un estanque de 0.70 hectáreas (el que es utilizado de manera recreativa, presentando flora y fauna), seguidamente se extrae el recurso del estanque para ser utilizado en el sistema de riego del viñedo.

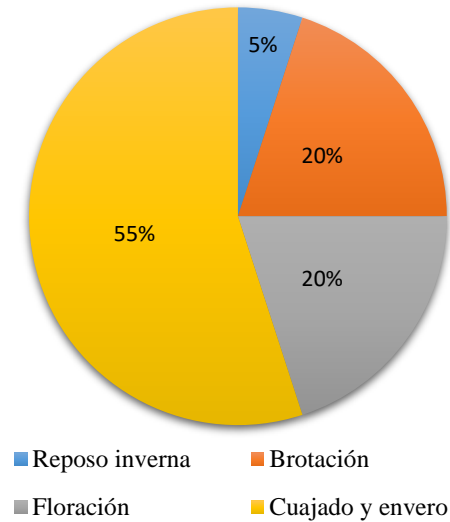


Figura 1. Distribución de la necesidad hídrica de la vid a lo largo de su ciclo vegetativo y reproductivo.

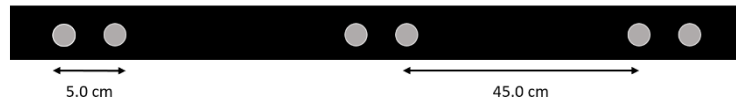


Figura 2. Modelo de cintilla utilizada en el riego por goteo en la zona de estudio.

Para analizar la calidad de agua de riego se extrajo una muestra en ambas fuentes de disposición, posteriormente se analizaron en el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP).

De acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis de calidad de agua de riego se determinó que el agua utilizada en la “Finca 2” presenta una condición de alto riesgo en salinización y un bajo riesgo de sodificación; mientras que, el agua utilizada en la “Finca 1” se expone con un riesgo medio de salinización y un riesgo bajo de sodificación, lo anterior se determinó a partir de las variables Conductividad eléctrica (CE) y Relación de Adsorción de Sodio (RAS), según la metodología de cuantificación de la USDA en 1954.

En el CAPÍTULO 2 “CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y AGUA DE RIEGO DE LA ZONA DE ESTUDIO” se presenta detallada la metodología y los resultados obtenidos.

1.4 Representación de la microcuenca

La zona de estudio se encuentra ubicada entre los límites de los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, ambos en el estado de San Luis Potosí. El estado de S.L.P se encuentra dentro de las regiones hidrológicas (RH) número 37, El Salado, la cual cubre la zona noroccidental del estado y número 26 con nombre Pánuco, la cual se ubica en la zona suroriental. Los municipios de Soledad de Graciano Sánchez y San Luis Potosí se ubican dentro de la RH 37, el clima en ella es seco y semiseco, con corrientes hidrológicas intermitentes, ya que solo aparecen en temporada de lluvias con un alto grado de infiltración y evaporación. En la RH 37 dentro del territorio potosino se encuentran 7 cuencas, siendo la cuenca Presa San José-Los Pilares y Otras, la que cubre el centro – occidental del estado y por consiguiente los municipios donde se ubica la zona de estudio; la subcuenca ubicada en la zona de estudio es la que lleva por nombre Presa San José (INEGI, 2002).

A partir de la red hidrológica que se encuentra comprendida en la zona de estudio, se trazó una microcuenca con la ayuda del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL) Versión 3.2 del INEGI y la extensión ArcMap 10.2 del Software ArcGIS.

La microcuenca trazada es plana de tamaño medio, de tipo exorreica, ya que se comunica con la red principal de la subcuenca; los flujos o la trayectoria de los caudales dentro de la microcuenca se determinaron como aguas arriba, esto a partir del análisis en el SIATL. El área calculada con el uso de ArcMap 10.2 es de 1119.55 Km² y un perímetro de 186.5 Km.

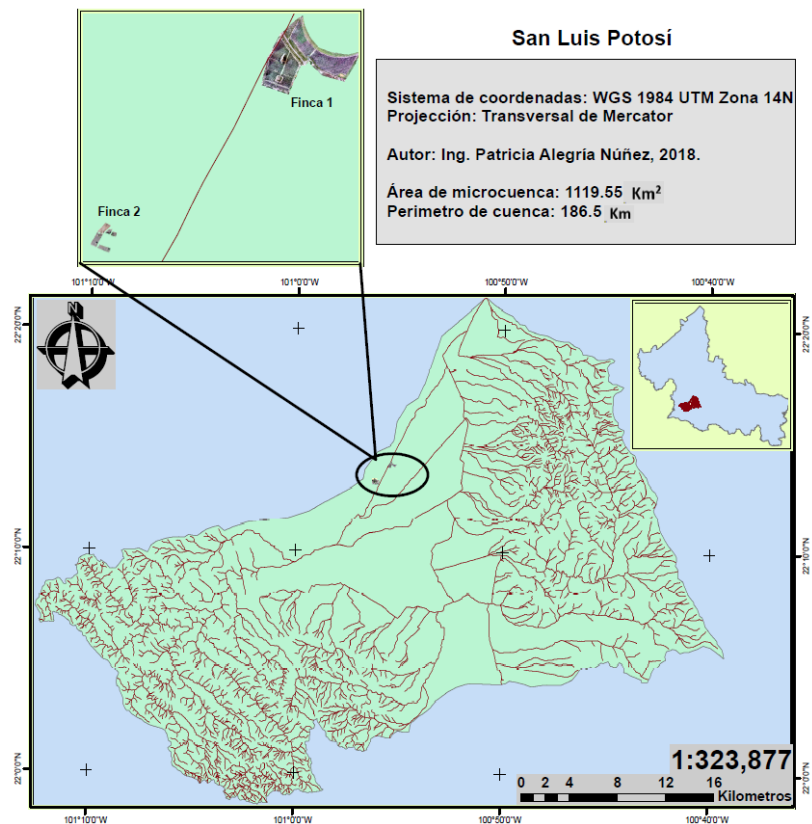


Figura 3. Delimitación de la subcuenca en la que se ubica la zona de estudio.

1.5 Descripción de suelo y topografía de la zona en estudio

La actualización de la frontera agrícola de México para el 2016 por el Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en el 2018 menciona una superficie de 24.6 millones de hectáreas equivalente al 12.6% del territorio nacional, aunado a la gran diversidad de suelos en México se da origen y sustento a la biodiversidad de producción agrícola con modalidad de temporal y riego, ésta última, logra incrementar los niveles de rendimiento y calidad del producto final, sin embargo, un exceso de riego contribuye a la contaminación, difusión de enfermedades y degradación del suelo (INCA y SIAP, 2012). Respecto a la contaminación de suelos, se señala a la salinidad como una de las causas más relevante en el retraso del desarrollo de las plantas y pone en riesgo la viabilidad económica de los sistemas productivos. Es por esto que el principio fundamental para el desarrollo agrícola, es garantizar un suelo con condiciones fisicoquímicas idóneas para la producción, pues de éstas depende su fertilidad.

El suelo productivo de la zona de estudio se caracterizó bajo el régimen de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, obteniendo las siguientes texturas; Franco arcilloso, Franco arenoso, Franco arcillo arenoso, Franco limoso y en más del 50% del área de ambas fincas se caracterizó como un suelo Franco; la estructura encontrada fue esferoide de tipo granular medio, a excepción de las texturas Franco arcilloso y Franco arcillo arenoso, las que presentaron un alto grado de compactación y una estructura laminar espesa, son suelos con una capa arable delgada no mayor a 8 cm. Respecto al estudio del pH, éste varía de 5.4 a 7.2 en ambas fincas.

En cuanto a la topografía de la zona, se caracterizó con una pendiente ligeramente suave casi a nivel, no apreciable (de 1° a 3°), con un terreno sin cobertura entre calles y un elevado uso de maquinaria agrícola, ambos, propiciando la compactación del suelo, pérdida de microorganismos y alto grado de erosión.

En el CAPÍTULO 2 “CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y AGUA DE RIEGO DE LA ZONA DE ESTUDIO” se presenta detallada la metodología y los resultados obtenidos.

1.6 Caracterización del cultivo *Vitis vinifera*

La vitivinicultura es una rama de la agricultura enfocada en el arte de cultivar, cuidar y procesar el fruto de la vid para la obtención de vino. La vid es una planta perenne y posee un periodo vegetativo con cosechas anuales. *Vitis vinifera* es un cultivo de historia y tradición, es una planta rústica, de pocos requerimientos nutricionales, trepadora y catalogada como cultivo frutal o industrial, derivando más de 7000 variedades, mismo que se debe a su fácil adaptación y desarrollo en regiones, climas y suelos diversos. La planta es un recurso clave en el éxito de la calidad del vino, es importante conocer el origen y las características fisiológicas del material (injerto y portainjerto) para asegurar la pureza del varietal, además de conocer el requerimiento hídrico para mantener la humedad apropiada para su óptimo desarrollo (Villareal *et al.*, 2007).

El viñedo en estudio cuenta con 9 variedades productivas sembradas a 3.0 m entre hilera y a 1.30 m entre planta con una densidad de siembra de 2564 plantas por hectárea.

Cuadro 1. Taxonomía de *Vitis vinifera*.

<i>Vitis vinifera</i>	
Reino	Vegetal
División	Espermatófitas
Subdivisión	Angiospermas
Clase	Dicotiledóneas
Orden	Rhamnales
Familia	Vitáceas
Genero	Vitis
Subgénero	Euvtis



Figura 4. Densidad de siembra de *Vitis vinifera*.

1.6.1 Caracterización de variedades y ciclo fenológico

La variedad cultivada es uno de los factores determinantes en el emprendimiento enológico, influyendo directamente en la calidad y la tipicidad del vino. Cada variedad presenta características físicas determinantes de la planta y condiciones fisicoquímicas del fruto y del vino, las cuales dan la determinación propia y distintiva (Sotés, 2011). Caracterizar las variedades, su comportamiento agronómico y fenológico, es importante en la toma de decisiones y programación de riego, fertilización y prácticas culturales (Asensio, 2000).

La caracterización de las variedades en estudio tiene como objetivo identificar particularidades agronómicas del cultivar, mismas que permitirán determinar parámetros de estrés hídrico del cultivo, además de conocer el grado de sensibilidad a plagas y enfermedades, nutrición y adaptación.

La zona de estudio cuenta con 9 variedades productivas en 2 ciclos de siembra (2010 y 2011).

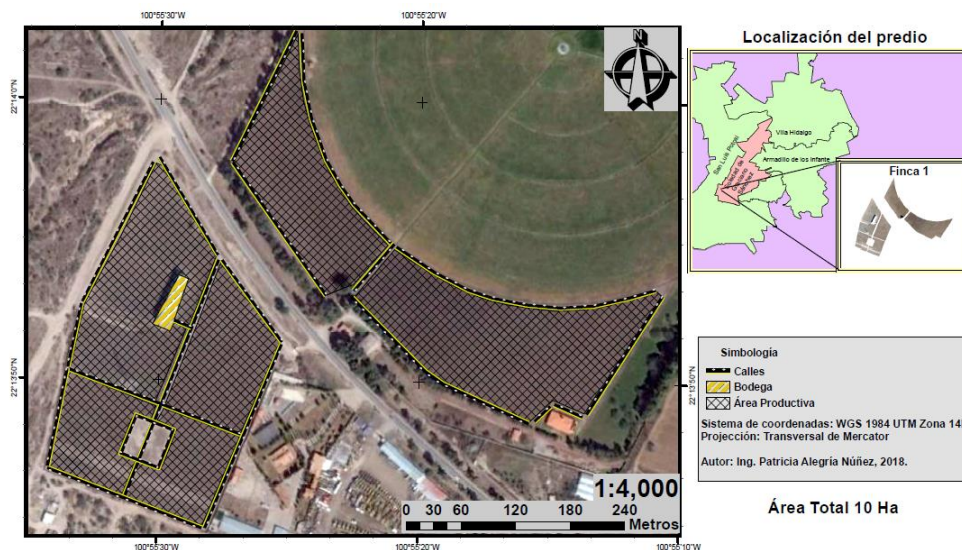


Figura 5. Área productiva de 10 hectáreas en Finca 1.

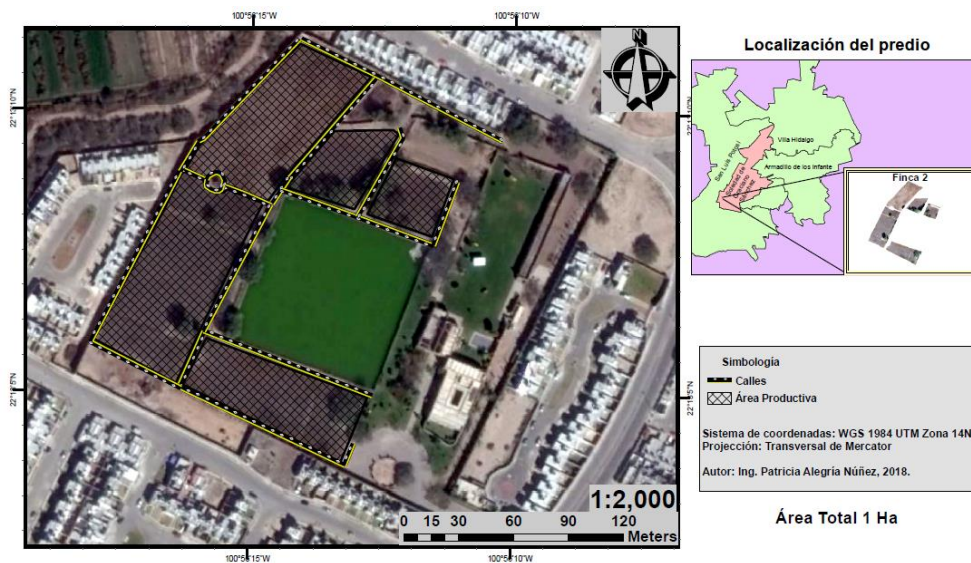


Figura 6. Área productiva de 1 hectáreas en Finca 2.

Sauvignon Blanc

Variedad original de Burdeos, plantas vigorosas con porte denso, productiva con rendimiento medio y maduración temprana, brotación media-precoz, tendencia a tener mucha hoja de tamaño mediano y con gusto por la alta radiación en climas secos o templados, se adapta a todo tipo de suelo, pero prefiere suelos de tipo franco con poca fertilidad; presenta sensibilidad a Botrytis y a la Yesca; sensible a fríos invernales y heladas.

Sus vinos presentan un color amarillo paja con matices verdosos tenues, perfume aromático e intenso pero delicado que recuerda a pimiento amarillo, de sabor seco, elegante, cálido y aterciopelado. A la boca se destacan los sabores a pasto recién cortado, heno, humo y pomelo.

Cabernet Sauvignon

Variedad de la zona bordelesa, medianamente vigorosa, planta altamente adaptable a diversos climas, es una planta de ciclo largo y maduración media, con brotación tardía de hoja de tamaño medio, muestra rendimientos bajos con tamaño de racimo medio-bajo y adaptación apropiada en suelos con roca y bien drenados; presenta sensibilidad a Oídio.

El vino posee aptitud para el añejamiento, se caracteriza por su color rojo violáceo, con aromas intensos a frutos rojos como grosellas frescas. A la boca es frutado y concentrado. Cuando la uva presenta alto grado de madurez se obtienen vinos con taninos suaves y una dulzura agradable.

Cabernet Franc

Originario de la región de Burdeos, presenta ligera intensidad de color y estructura técnica que Cabernet Sauvignon; hoja de tamaño medio, variedad vigorosa de maduración temprana de bajo rendimiento, racimo de dimensión media, tolera el clima frío y se adapta a todo tipo de suelo inclusive suelos arenosos sin estrés hídrico; sensible a la deficiencia de magnesio y aunado a la época de lluvias hay incidencia en podredumbre de racimos, Botrytis y Yesca. Vinos aromáticos.

Malbec

Es un cultivar nato de Francia de la región de Burdeos, presenta maduración media con altos rendimientos, logra un equilibrio entre los azúcares y ácidos, exigente respecto al clima y suelo (prefiere suelos arcillosos-calcáreos y pedregosos con climas cálidos y secos), es sensible a las heladas y presenta una variabilidad respecto al grado de vigor; muestra sensibilidad a Mildiu y medianamente sensible a Oídio.

Los vinos elaborados con esta vid presentan una alta calidad, se destacan por un color intenso y oscuro, con reflejos violáceos y aromas a guinda, ciruela, pasa y chocolate. A la boca se perciben sabores a frutas secas, chocolate, ciruela y vainilla. Se presentan además taninos dulces que los convierten en cálidos y suaves.

Merlot

Original de Burdeos, se muestra medianamente vigorosa con altos rendimientos (debe considerarse un control para no disminuir calidad), con brotación y maduración media, se destaca por su fácil adaptabilidad a diversos climas y tipos de suelos, en clima seco necesita irrigación frecuente. La cepa es bastante sensible a fríos invernales; con sensibilidad a Mildiu y Botrytis.

El vino presenta una excelente calidad, destacando un color rojo carmín intenso y aromas varietales agradables a grosellas, moras y con reminiscencias a mermelada de frutos rojos como ciruela y guinda, con acidez tendencialmente baja. A la boca son menos tánicos que los Cabernet Sauvignon, más frutados, carnosos, con sabores a ciruela, rosas y pasas de uva.

Pinot Noir

Cepaje cultivado en Borgoña y Champaña, de vigor medio, maduración precoz-temprana y adaptable a diversos tipos de suelo, siempre y cuando sean húmedos y fértiles, con sensibilidad al clima frío y a un alto grado de radiación, prefiere climas templados y no excesivamente cálidos además de una buena exposición, por otra parte, es una variedad que demanda alto requerimiento de magnesio y presenta sensibilidad a hongos y enfermedades como Botrytis y Podredumbre.

Los vinos tintos tranquilos se caracterizan por ser complejos, destacado e intenso color rojo rubí y su aroma frutal, con notas de cereza, cassis, grosella y mora. A la boca se perciben sabores a frutilla, cerezas y arándanos; vino de baja acidez, plenos, carnosos y con taninos dulces agradables.

En la vinificación blanca, fragante aroma y buen cuerpo; puede perfilarse como uno de los vinos más tranquilos.

Nebbiolo

Originario del norte de Italia, es un cultivo de floración temprana y maduración tardía, sensible a podredumbre. Algunas notas de la cata de Nebbiolo son sus tonos magenta a purpuras intensos, los de mayor edad tienen un tono rojo granada con tonalidades a arcillas, sus sabores son a trufa, cerezas rojas, suaves especias y flores secas. Presenta una carga frutal con delineada acidez que contrapuntea un tanino compacto, maduro y terroso.

Viognier

Variedad originaria de la región Ródano en el sur de Francia, es una planta vigorosa de brotación precoz, productiva, de rendimiento medio y maduración temprana; se adapta con facilidad a diversos tipos de suelo siempre y cuando no presenten una nutrición elevada, presenta una tolerancia a la sequía, se desarrolla mejor en climas cálidos, pero no demasiado secos; muy propensa a enfermedades durante el periodo de lluvias.

La característica de la variedad da pie a vinos muy aromáticos, complejos, de buen cuerpo y calidad, con sabores a damasco y durazno, en ocasiones resulta carente de acidez y presenta un gusto amargo.

Syrah

Variedad original del sureste de Francia, Syrah muestra cepas vigorosas y productivas con diferentes niveles de calidad por cosecha, presentan una brotación media-tardía y maduración media, produce racimos de tamaño medio y cilíndrico, con baya de forma ovalada, pulpa dulce y tamaño medio; es una planta sensible a vientos fuertes, fríos invernales y heladas, por lo tanto, presenta una buena adaptación a ambientes cálidos y poco ventosos; manifiesta sensibilidad a Botrytis en la maduración y a los ácaros.

Proporciona vinos de color rojo rubí, con tendencia al color purpura, de buena estructura, alcohólicos, muy aromáticos, finos, complejos y tánicos. Permite la elaboración de vinos afrutados e interesantes para mezcla con vinos menos aromáticos.

Las caracterizaciones de las variedades fueron basadas en los autores Villareal *et al.*, 2007; Vivai Cooperative Rauscedo sca., 2013; Cabello *et al.*,

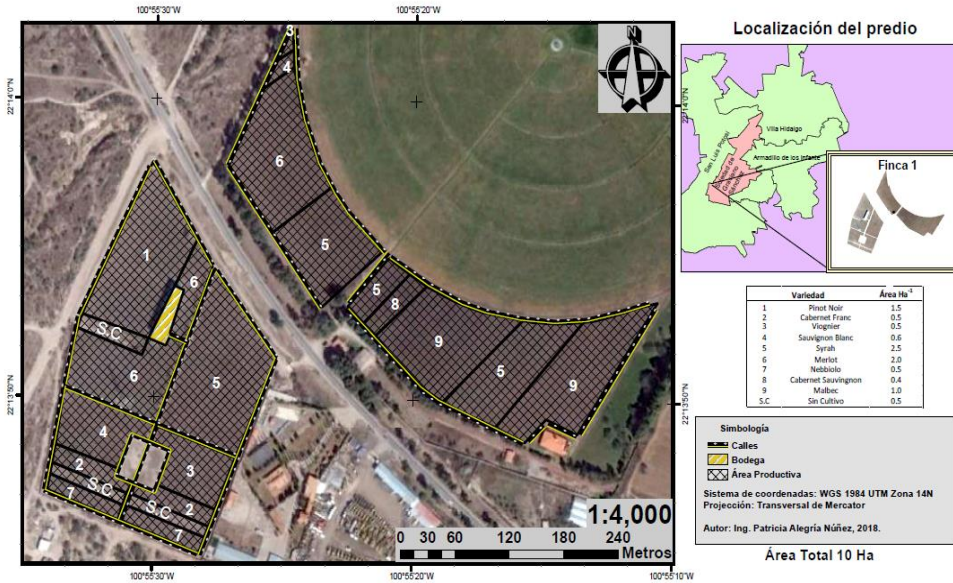


Figura 7. Delimitación de variedades Finca 1.

La vid es una planta perenne de ciclo anual que presenta el ciclo vegetativo y reproductivo de forma simultánea (Villareal *et al.*, 2007), su desarrollo se ve influenciado por factores climáticos y por el régimen de riego que se determina en la zona de producción.

Los cambios presentes en la planta mantienen un orden cronológico que comienza con el crecimiento vegetativo (brotación a 12° C) tiempo después del inicio del lloro (caída de líquido después de realizar poda de estímulo), seguidamente el crecimiento de todos los órganos que la conforman, posterior a la cosecha se presenta el agostamiento, la caída de la hoja y por último se presenta un reposo invernal en donde todas las funciones de la planta se encuentran en periodo de latencia (Villareal *et al.*, 2007; Flores, 2015; Martínez, 2015; Pascual y Cabrerizo, 1995).

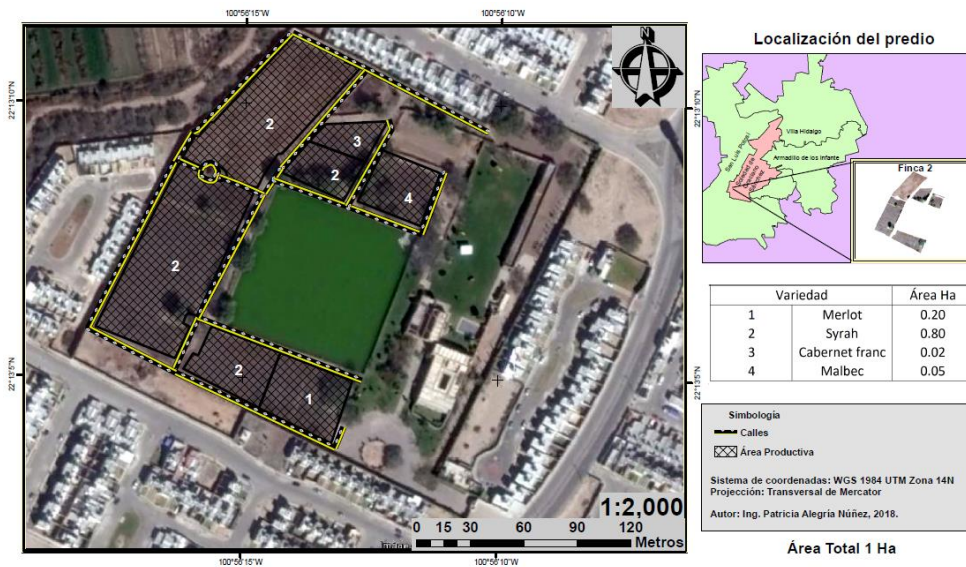


Figura 8. Delimitación de variedades Finca 2.

El ciclo reproductivo comienza en el crecimiento de los órganos sexuales (la iniciación floral), seguido de la floración y el cuajado del fruto para posteriormente presenciar el periodo del desarrollo de las bayas y por último la maduración del fruto (envero y madurez) la cual depende del control del riego y de la temperatura óptima para el proceso (Villareal *et al.*, 2007; Flores, 2015; Martínez, 2015; Pascual y Cabrerizo, 1995), una vez madurado el fruto se realiza el proceso de vendimia y producción del vino. Posterior a la cosecha, entra el periodo de agostamiento y concluye en el reposo invernal.

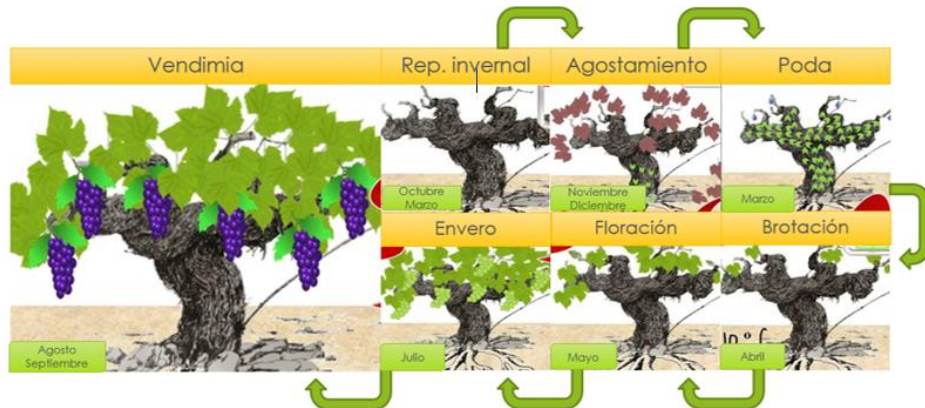


Figura 9. Estadios del ciclo vegetativo y reproductivo de la vid en el estado de San Luis Potosí.

1.7 Caracterización meteorológico-climática de la zona en estudio

El cultivo de vid depende de diversos factores para su apropiado desarrollo vegetal, entre los cuales los más importantes son el clima y el suelo. Cada condición climatológica y edafológica dan pie a una condición particular del producto final determinando su calidad y rendimiento. A lo largo del tiempo la vid ha presentado una increíble adaptación en los cinco continentes poblados, sin embargo, diversos autores mencionan que la calidad del vino desciende conforme se pierden las condiciones del clima mediterráneo (Pascual y Cabrerizo, 1995).

Las variables meteorológico-climáticas que se consideran relevantes en el desarrollo del cultivo son la temperatura, luminosidad, radiación neta, horas frío, requerimiento hídrico (precipitación), humedad relativa y velocidad del viento.

El Ministerio de Agricultura y Riego de Perú (MINAGRI) menciona respecto a la **Humedad Relativa**, que es deseable un rango de 60% a 80%, sin embargo, ésta puede variar de acuerdo a las condiciones de la zona de producción, entre ellas la variable de velocidad del viento. La cantidad de lluvia o riego establecido en la zona de producción a lo largo del ciclo productivo juegan un papel determinante en la calidad del fruto y los rendimientos obtenidos.

Diversos autores mencionan un **requerimiento hídrico** por encima de 170 mm y rondando los 600 mm, es ideal para la obtención de un fruto de calidad (Ferreira *et al.*, 2002; García *et al.*, 2017; Guzmán *et al.*, 2008; Pascual, 1995).

La variable **temperatura** es el factor climático más importante para determinar cada etapa del ciclo vegetativo y reproductivo de la vid. En el caso del reposo invernal, es necesario que se presente una temperatura ambiental por arriba de los 10°C para reiniciar el funcionamiento de las raíces de la planta y salir del reposo; la temperatura ideal para la brotación de los tallos (después de la poda) es de 12°C o por arriba de ésta, además de que la orientación y la exposición de luminosidad es fundamental para una brotación exitosa; durante el proceso de floración, fecundación y formación del fruto, se espera tener temperaturas que van desde los 16°C hasta 22°C y en el periodo de maduración es indispensable alcanzar temperaturas por encima de los 18°C sin rebasar los 24°C durante el día y temperaturas nocturnas entre los 2.8°C y 4°C según variedades en producción (Valor y Sánchez, 2003; Pascual y Cabrerizo, 1995).

La vid requiere una abundancia de luz, alrededor de 1500 a 1600 **horas luz** son las recomendadas por Almanza en el 2011, éste rango de horas luz cubre todo el periodo vegetativo; el requerimiento de **horas frío** son fundamentales para inducir el periodo de reposo invernal en el cultivo de vid y al completar el rango de horas deseado por la planta ésta sale del periodo de latencia, activando nuevamente su sistema. Westwood propuso en 1982 un rango de 150 a 1200 **horas frío**, haciendo mención que el número de horas dependerá de la variedad, suelo y condición climática en la que la planta se desarrolle, mientras que la falta de acumulación de horas frío logra reducir la brotación y retrasar la maduración del fruto (Pinto *et al.*, 2003).

Para el desarrollo de la presente investigación se trabajó con datos de la estación meteorológica del INIFAP San Luis – Municipio: San Luis Potosí y las estadísticas del Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017 con estación meteorológica con clave 24-032. Identificando una temperatura promedio de 17.7°C para los años de 1945 a 2015; una temperatura del año más frío de 15°C y la temperatura del año más caluroso de 20.3°C. Una precipitación anual promedio de 326.2 mm para el periodo de 1961 a 2015, con el año más seco con 109.0 mm y para el año más lluvioso de 555.7 mm. Una HR que no supera el 65% y una velocidad del viento no mayor a 25 km/h.

1.8 Conclusiones del capítulo 1

- ❖ La relación agua-suelo-planta-atmósfera integra las cuatro variables fundamentales que deben considerarse para la toma de decisiones en campo, tales como la siembra de un cultivo agrícola y la variedad más apropiada respecto a las condiciones climáticas y de suelo, mejora en los procesos de nutrición si se cuenta con deficiencia en campo, propuestas de mejora en el sistema de riego o drenajes según sea el caso, mejora de prácticas agrícolas de mantenimiento que van acorde al tipo de suelo y la demanda del cultivo en producción. Todo lo anterior con el objetivo de lograr un equilibrio e incremento en la rentabilidad, calidad y rendimiento del cultivo.
- ❖ El agua de riego utilizada en la Finca 1 presentó una calidad media, con un riesgo medio de salinización y un riesgo bajo de sodificación; la Finca 2 mostró un alto riesgo de salinización y un bajo riesgo de sodificación. Con los riesgos de salinidad que presentan cada una de las aguas analizadas se prevén complicaciones de salinidad en suelo las cuales se corroboraron con análisis fisicoquímico del suelo, dicho grado de salinidad trajo consigo un bajo rendimiento en la variedad Malbec de ambas fincas en estudio.
- ❖ Solo ocho de las nueve variedades en producción han presentado una buena adaptación a las condiciones meteorológico-climáticas presentes en la zona de estudio, lo cual se ve reflejado en la producción del vino elaborado a partir de la uva cosechada, el cual mantiene condiciones organolépticas favorables y de gran valor comercial, logrando posicionarse con reconocimiento de Medalla de Oro a la etiqueta de Sauvignon Blanc 2017 en el Festival del Vino S.L.P. 2018.
- ❖ La variedad Malbec ha presentado un bajo rendimiento a lo largo de su ciclo productivo en las dos fincas de estudio, el cual se atribuye al grado de salinidad que presenta el suelo en donde se ubicó la plantación.

En la Finca 1 y 2 se encontraron porcentajes de sodio en suelo que rebasan el rango ideal propuesto por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (0 -25 % sodio), obteniendo valores que van de 24.38 % hasta un 35 % de sodio y 45.40 % hasta 50.42% de sodio, respectivamente.

1.9 Abreviaciones del capítulo 1

Botrytis	Podredumbre en la planta de vid causada por el hongo <i>Botrytis cinérea</i> (Moyer, 2015).
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
INCA	Instituto Nacional para el Desarrollo de Capacidades del Sector Rural, A.C.
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Mildiu	Enfermedad que se manifiesta en las hojas de la planta de vid (mancha amarilla de aceite), provocada por el hongo de desarrollo interno <i>Plasmopara viticolci</i> (Rodríguez, 1996).
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego, (PE).
Oídio	Enfermedad que ataca el cultivo de vid, principalmente la zona foliar y racimos, ocasionada por el hongo <i>Uncinula necátor</i> Burr (Rodríguez, 1996).
RASPA	Relación agua, suelo, planta y atmósfera.
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.
SIAP	Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.
USDA	United States Department of Agriculture, (US).
Yesca	Enfermedad parasitaria en la planta de vid producida por los hongos lignófagos: <i>Stereum hirsutum</i> Per. y <i>Phellinus igniarius</i> Fr. (Izquierdo <i>et al.</i> , 2009).

1.10 Bibliografía del capítulo 1

- Asensio M. 2000. Caracterización de variedades de *Vitis vinifera* L. cultivadas en Extremadura, mediante estudios morfológicos, agronómicos y bioquímicos. 397 pp.
- Ayers, R. 1989. Water quality for agriculture. United States (US). ISBN 92-5-102263-1.
- Azcón, J., Talón, M. 2000. Fundamentos de Fisiología Vegetal.
- Cabello, F., Rodríguez, I., Muñoz, G., Rubio, C., Benito, A., García, S. La colección de variedades de vid de “El Encín”. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Madrid (ES). ISBN: 84-451-2411-0 208 pp.
- Ferreya, R., Selles, G., Peralta, J. 2002. Efectos de la restricción del riego en distintos periodos de desarrollo de la vid Cv. Cabernet Sauvignon sobre producción y calidad del vid. Chile (Ch). ISSN 0365 – 2807.
- Flores, T. 2015. Evaluación de variedades de vid (*Vitis vinifera*) y fuentes de fertilización en producción de hoja para consumo humano. [Tesis Maestría. Ciencias en Producción Agrícola.] Nuevo León (MX): Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. 65 pp.
- García, F., Gil, M., García, P. 2017. El vino y su servicio. 2ª edición. Madrid (ES). ISBN: 978-84-283-3862-2.
- Gil. E., Aranda, I., Peguero, J., Vilagrosa, A. 2005. El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. España (ES). 13 pp.
- Guzmán, C., Valenzuela, C., Félix, P., Jiménez, A., Ruiz, S. 2008. Necesidad hídrica de los principales cultivos en el estado de Baja California. INIFAP. México (MX). 35 pp.
- IICA. 1983. Relación Agua Suelo Planta: Requerimientos de Agua de las Plantas en Relación en el Clima y el Suelo para una Producción Óptima. República Dominicana (DO). ISSN 0534-5391.
- INCA., SIAP. 2012. Reglas de Operación y Programación Sectorial. SAGARPA. México (MX).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2002. Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí. 1ª Edición. México (MX). ISBN 970-13-3631-3. 136 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017. México (MX). 623 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). SIATL Versión 3.1 México (MX).

- Izquierdo, P., Chacón, J., Fernández, M., Martínez, J., García, E., Torres., R. 2009. Detección, identificación y tratamiento de los hongos responsables de las enfermedades de la madera en vid. Instituto de la Vid y el Vino Castilla la Mancha. España (ES). 10 pp.
- López, Y. 2000. Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera. Colombia (CO). ISBN: 958-8095-05-0. 90 pp.
- Martínez, M. 2015. Estudio comparativo de las relaciones hídricas y producción en uva de mesa bajo riego deficitario (RD) y desecación parcial de raíces (DPR). Efecto del déficit continuo y controlado. [Tesis Maestría. Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario.] Cartagena (CO): Universidad Politécnica de Cartagena. 68 pp.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). Requerimientos agroclimáticos del cultivo de vid. Ficha técnica N°10. Ofic. 209-8800 anexo 4233. Perú (PE).
- Moyer, M. 2015. Podredumbre por Botrytis en la uva para producción comercial en Washington: Biología y manejo de enfermedades. Washington State University. 5 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. 2002. Diario Oficial. Segunda Sección. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México (MX). 73 pp.
- Pascual, N., Cabrerizo, A. 1995. Distribución espacial del viñedo de Rioja en relación con las condiciones ambientales. España (ES). 22 pp.
- Pinto, M., W. Lira, H. Ugalde y F. Pérez. 2003. Fisiología de la latencia de yemas de vid. Hipótesis actuales. Chile (CL) 17 pp.
- Rodríguez, P. 1996. Plagas y enfermedades de la vid en Canarias. 3ª Edición. Canarias (ES). Gobierno de Canarias. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. 29 pp.
- Rundell, P., Jarrell, W. 1991. Water in the environment. eds: Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation. London. 29-56 pp.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2018. Utilidad de la Frontera Agrícola de México. SAGARPA. México (MX).
- Sotés, V. 2011. Avances en viticultura en el mundo. Rev. Bras Frutic. Vol. Especial. Brasil (BR). E 131 – 143 13pp.
- USDA. 1954. Diagnostic and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No.60 United States (US). 166 pp.
- Villareal, P., Romagnoli S., Llorente A. 2007. Pautas tecnológicas: vid para vinificar. Manejo y análisis económico financiero. 1ª. Ed INTA. Argentina (AR). ISBN-13: 978-987-521-229-9. 104 pp.

Valor, O., Sánchez, J. 2003. Brotación, fertilidad de brotes laterales y ubicación del racimo en el cultivar de vid Tucupita en condiciones tropicales. Venezuela (VE). Vol. 15. Num 3. ISSN: 1316-3361 201-208 pp.

Vivai Cooperative Rauscedo sca. 2013. Catálogo general de las variedades y los clones de uva de vino y de mesa. Italia (IT) 156 pp.

Westwood, M. 1982. Fruticultura de zonas templadas. Editorial. Mundi Prensa, Madrid. 461 pp.

CAPÍTULO 2

CARACTERIZACIÓN DEL SUELO Y AGUA DE RIEGO DE LA ZONA DE ESTUDIO.

2.1 Nutrición de suelos

El suelo, es el resultado de procesos que actúan en él por exorbitantes periodos de tiempo. Según la Norma NOM-021-RECNAT-2000 el suelo “Es una colección de cuerpos naturales formados por sólidos (minerales y orgánicos), líquidos y gases sobre la superficie del terreno, presenta horizontes o capas que se diferencian del material de origen como resultado de adiciones, pérdidas, migraciones y transformaciones de energía, materia o por la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural”. Desde el punto de vista agrícola, el suelo es la capa de materia fértil que recubre la superficie de la Tierra y que es explotada por las raíces de las plantas a partir de la cual obtienen sostén, nutrimentos y agua (Sumner, 1999). Las características de los suelos varían respecto al tiempo y espacio, condiciones como: temperatura, porosidad, humedad y nutrición son características dinámicas, mientras que la textura y estructura son condiciones estáticas que logran cambiar, pero solamente a largo plazo (EARTH, 2013). Las condiciones meteoroclimáticas del sitio de producción son variables importantes que influyen directamente en la formación y pérdidas de suelo, así como en el crecimiento, sanidad y calidad de las plantas (FAO, 2009).

El INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) en el 2007 declaró que a lo largo de la república mexicana existen 26 de los 32 grupos de suelo reconocidos por el Sistema Internacional Base Mundial del Recurso Suelo. En relación a la zona de viñedos en estudio se encuentran dos grupos dominantes de suelo, los Luvisoles y los Durisoles, mismos que se encuentran en los límites del municipio de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez. El grupo Luvisol presenta suelos que tienen un mayor contenido de arcillas en el subsuelo que en la superficie arable, la presencia de arcillas en el subsuelo induce cierto grado de compactación y reducen el grado de infiltración del agua. El grupo Durisol, se asocia en zonas con ambiente árido y semiárido, generalmente se relaciona con superficies planas o de escasa pendiente, son suelos poco profundos con un drenaje moderado y con presencia de sílice (SiO_2). Si a un suelo del grupo Durisol no se le da un apropiado manejo puede presentar a mediano plazo un grado de erosión considerable casi irreversible, aunado a esto la presencia en exceso de sales solubles pueden afectar aún más su productividad (FAO, 2009).

Las propiedades físicas y químicas de un suelo deben de ser objeto de estudio de un suelo virgen con objeto de convertirse en un suelo agrícola, pues éstas definen la capacidad productiva de un suelo, determinando la rigidez y la fuerza de sostenimiento a una planta, facilidad de penetración de raíces, aireación, capacidad de retención de humedad o de drenaje, plasticidad y retención de nutrientes; en cambio, en un suelo productivo es necesario monitorear el comportamiento de la humedad en campo, el grado de nutrición con el que se cuenta e identificar deficiencias presentes en ellos y proponer programas de fertilización que ayuden a su recuperación (Rucks *et al.*, 2004).

Es fundamental conocer las condiciones presentes en un suelo de estudio para entender en qué medida y como son determinantes e influyentes en el desarrollo de una planta; y como el hombre a lo largo del proceso productivo puede modificarlas y comprender su importancia (Rucks *et al.*, 2004).

2.1.1 Determinación de puntos de muestreo

Para conocer el estado de nutrición y calidad del suelo se realizó un análisis fisicoquímico del suelo de la zona de estudio, se determinaron bloques y puntos de muestreo para la extracción de las muestras y su posterior análisis en el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, bajo el régimen de la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000.

Los bloques de muestreo fueron determinados a partir de un plan de muestreo, considerando criterios de los trabajadores de las fincas en estudio, tales como: edad de la plantación, comportamientos anómalos de las variedades y productividad, además de un mapeo de suelos en donde se consideró la densidad de siembra de la plantación, orientación, distribución del riego, tipo de suelo y condiciones físicas de las plantas (altura, grosor de tallo, deficiencia de nutrientes visible en hoja).

En la Finca 1 y en la Finca 2 se determinaron 15 y 7 bloques de muestreo, respectivamente; para las zonas de extracción de suelo se determinaron puntos muestrales aleatoriamente sistematizados, los cuales dieron pie a la generación de muestras compuestas. Las Figuras 10 y 11 muestran la distribución de los bloques de muestreo para cada una de las fincas, así como la determinación de los puntos de extracción de suelo.

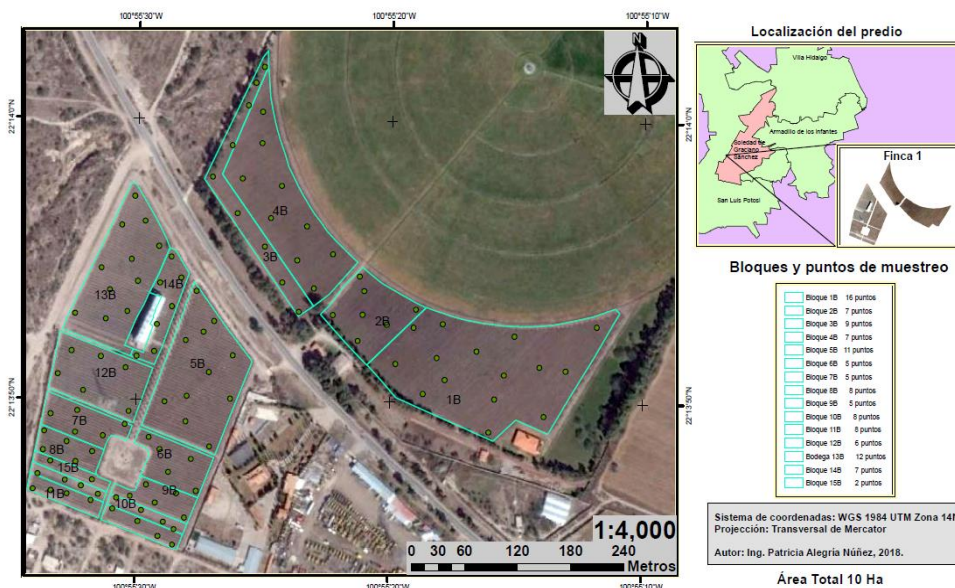


Figura 10. Delimitación de bloques y puntos de muestreo de la Finca 1.

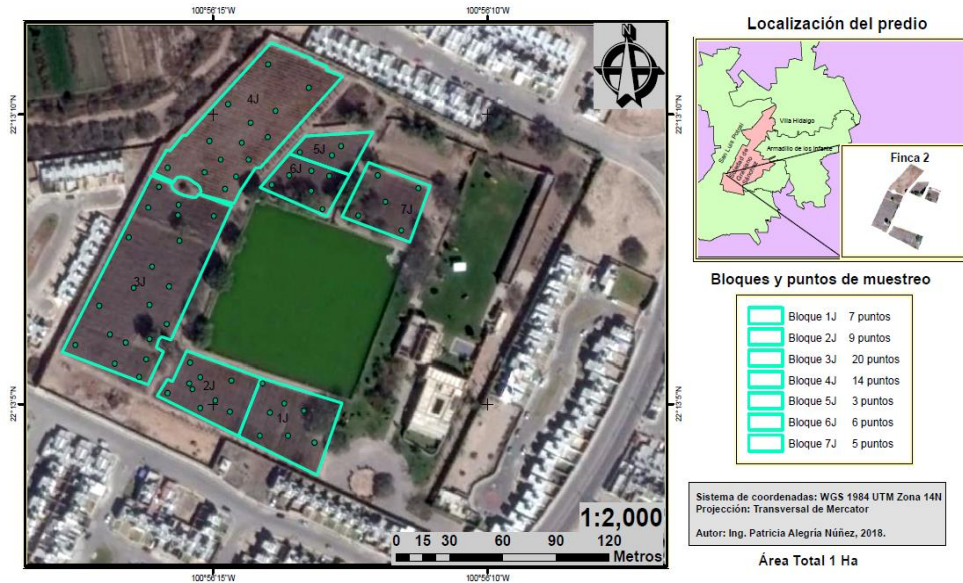


Figura 11. Delimitación de bloques y puntos de muestreo de la Finca 2.

2.1.2 Metodología para la recolección de muestras

El muestreo se define según la Norma NOM-021-RECNAT-2000, como un procedimiento para la obtención de una o más muestras representativas de un terreno. Mediante el muestreo la heterogeneidad de los parámetros del suelo fue estimado en su valor promedio, colectando un determinado número de muestras de cada bloque de análisis y determinando muestras compuestas a partir de las submuestras tomadas.

El muestreo de suelo constituye el primer paso del análisis fisicoquímico en laboratorio y determinará el grado de confiabilidad de los resultados obtenidos (INIFAP, 2012).

La metodología del muestreo de suelo para ambas fincas en estudio fue el siguiente:

1. Establecimiento de los puntos de muestreo en campo, utilizando el método de Zig-zag aleatoriamente sistematizado.
2. Georreferenciación de cada uno de los puntos de muestreo con el uso de GPS MobileMapper.
3. Se determinó una profundidad de muestra de 60 cm para cada uno de los puntos de estudio.
4. Con el uso de azadones y palas se limpió la superficie del suelo para la remoción de hierbas, residuos o rocas.

5. Se utilizaron poceras para hacer las excavaciones en el suelo, posteriormente se realizó la extracción del material para el análisis. El material recolectado de cada uno de los bloques de muestreo fue colocado en un contenedor para su posterior homogeneización y clasificación.
6. Al término de la recolección de cada bloque en estudio se realizó una homogeneización del material recolectado para generar una muestra compuesta. Se vertió el contenido completo del contenedor sobre una bolsa de plástico y se realizó la homogeneización del material.
7. La selección del suelo para la muestra compuesta se determinó a partir de cuadrantes mostrado en la Figura 12.
8. El volumen de la muestra compuesta (1.5 kg) se guardó en una bolsa de plástico y se etiquetó con la información correspondiente para su identificación.
9. Se limpió el material utilizado y se repitieron las operaciones para cada uno de los bloques de muestreo.

Para la metodología de muestreo de suelos se analizó en el manual del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) 2012, la Guía de curso: Propiedades de Suelos del Trópico de la Universidad EARTH 2013 y la Norma NOM-021-RECNAT-2000.



Figura 12. Ejemplo de recolección de muestra compuesta para un bloque de estudio.

Las muestras tomadas en campo se trasladaron al laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para su próximo tratamiento.

2.1.3 Metodologías de Análisis edafológicos básicos en laboratorio

Los suelos están conformados por una amplia variedad de aspectos, entre ellos, la sanidad, fertilidad, composición, estructura y textura. Por la variabilidad de condiciones fisicoquímicas que se presentan en un suelo se deben de considerar estudios que permitan la caracterización de la materia y la obtención de una radiografía de la condición de nutrición presente en él, además, el análisis es una herramienta importante que permite evaluar, evitar y corregir problemas de nutrición o contaminación en suelos (INEGI, 2000).

El preprocesamiento de las muestras de suelo se trabajaron a partir de la siguiente metodología:

1. Para la apropiada caracterización del suelo es necesario que la muestra se encuentre totalmente seca, por lo que se colocaron cada una de las muestras a lo largo de un pliego de papel estraza y se dejaron dentro del laboratorio a temperatura ambiente durante 72 horas.
2. Ya que cada una de las muestras se encontró totalmente seca, se realizó un triturado del suelo con el uso de morteros.
3. Una vez triturada la muestra se tamizó en malla < 2 mm, seguidamente se guardó en bolsas etiquetadas para su identificación y posterior tratamiento.



Figura 13. Ejemplo de pretratamiento en laboratorio para una muestra en estudio.

Determinación de textura

La proporción respectiva de grupos adimensionales de partículas (arcilla, limo y arena) en una muestra, dan como resultado la textura de un suelo. Al identificar la proporción de éstas partículas se genera una idea preliminar de las propiedades físicas del suelo. La determinación de textura se realizó bajo la metodología del Hidrómetro de Bouyoucos, ésta es una metodología rápida y aproximada, que se basa en la lectura de la densidad de la solución en la cual se suspende el hidrómetro, seguidamente a la suspensión del hidrómetro se realiza la lectura en distintos tiempos establecidos, en donde se ve reflejada la precipitación de las partículas de arcilla, limo y arena, además se tomar en cuenta la variable de la temperatura, ya que ésta influye en el grado de suspensión del hidrómetro.

Al terminar las lecturas con el hidrómetro en los periodos de tiempo establecido se realizan las correcciones pertinentes, mismas que están en función de la temperatura. Seguidamente se determinó la clasificación de la textura para cada una de las muestras de suelo analizadas, con la ayuda del triángulo textural (Del Valle, 1992; Norma NOM-021-RECNAT-2000).

La Figura 14 muestra el triángulo textural con el que se trabajó la clasificación de textura de cada uno de los suelos en estudio.

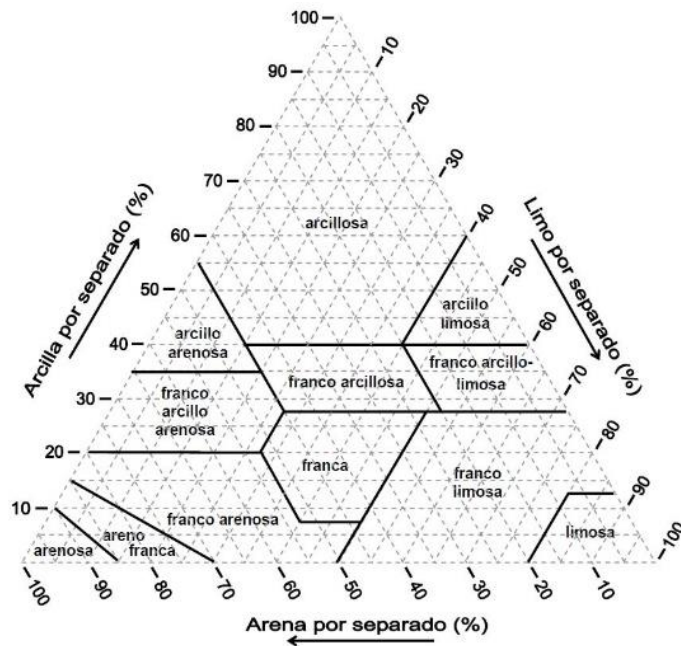


Figura 14. Triángulo de texturas.



Figura 15. Ejemplo de determinación de textura por el método de Hidrómetro de Bouyoucos.

Extracto de saturación del suelo

La práctica del extracto del suelo es la separación del mismo por filtración, centrifugación, succión o presión, con el objeto de obtener las sales solubles del suelo para realizar los análisis cualitativos y cuantitativos necesarios para su caracterización.

Para obtener el extracto del suelo se trabajó con la metodología de Del Valle (1992):

1. Se pesan 500 g de suelo seco y se vierten a un contenedor limpio.
2. Se comienza a verter agua destilada poco a poco hasta obtener un suelo saturado.
3. Se deja reposar durante un periodo de 24 horas.
4. Culminando las 24 horas de reposo se realiza la filtración en un embudo Becker con papel filtro y se conecta a una bomba de vacío.
5. Se extrae el extracto de saturación y está listo para trabajarse.
6. Se limpia el material utilizado y se repitieron las operaciones.



Figura 16. Ejemplo de la práctica: extracto de saturación para una muestra en estudio.

Determinación de Potencia de Hidrógeno (pH)

La determinación de pH se realizó en el extracto del suelo con el uso de un potenciómetro calibrado adecuadamente y conectado a un electrodo poroso, el cual se introduce a la solución que será medida. Es importante medir el pH, ya que es un indicador de la calidad del suelo e infiere que tipo de sales contiene el mismo, además controla reacciones químicas y biológicas en el suelo (Del Valle, 1992; Norma NOM-021-RECNAT-2000).

Cuadro 2. Clasificación de pH del suelo y agua (Norma NOM-021-RECNAT-2000).

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1 – 6.5
Neutro	6.6 – 7.3
Medianamente alcalino	7.4 – 8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

Determinación de Conductividad Eléctrica (CE)

El equipo utilizado para la medición de la CE, mide la resistencia eléctrica que ejerce el volumen de una disolución. A partir de ésta variable se logra inferir la concentración y el tipo de sales presente en la solución analizada (Del Valle, 1992; Norma NOM-021-RECNAT-2000).

Cuadro 3. Clasificación de CE del suelo y agua (Norma NOM-021-RECNAT-2000).

CE dS/m⁻¹ a 25°C	Efectos
<1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1 – 2.0	Muy ligeramente salino
2.1 – 4.0	Moderadamente salino
4.1 – 8.0	Suelo salino
8.1 – 16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino

Materia orgánica

La materia orgánica se refiere al material descompuesto, parcialmente descompuesto o sin descomposición de origen vegetal y animal presente en un suelo (FAO, 2009). Según sea el contenido de materia orgánica en el suelo, se puede llegar a modificar las condiciones físicas y químicas de dicha materia como: velocidad de infiltración, estructura del suelo, aireación de raíces, capacidad de campo, humedad aprovechable, microorganismos en suelo, capacidad de fijación de nutrientes, entre otros (Del Valle, 1992).

La metodología utilizada para el análisis fue la propuesta por el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, basado en el programa 420 de la metodología del DR/2000 Spectrophotometer Handbook.



Figura 17. Determinación de materia orgánica con el uso de HACH/2000.

Cuadro 4. Clasificación de contenido de materia orgánica en suelo (Norma NOM-021-RECNAT-2000).

Clase	Materia orgánica %	Materia orgánica %
	Suelos volcánicos	Suelos no volcánicos
Muy bajo	<4.0	<0.5
Bajo	4.1 – 6.0	0.6 – 1.5
Medio	6.1 – 10.9	1.6 – 3.5
Alto	11.0 – 16.0	3.6 – 6.0
Muy Alto	>16.1	>6.0

Nitrógeno Inorgánico

El nitrógeno mineral es el macronutriente más importante en el desarrollo de las plantas, se encuentra disponible a lo largo de todo el recurso suelo, sin embargo, la cantidad de nitrógeno presente no es suficiente para mantener idóneo el desarrollo de las plantas, por lo que es necesario suministrarlo en sus diferentes formas asimilables para una planta. En las aplicaciones de fertilidad se puede suministrar el nitrógeno inorgánico en su forma de Amonio (NH_4^+) o de Nitrato (NO_3^-) siendo los nitratos la forma más asimilable y preferible para la planta, otra forma de encontrar el nitrógeno en el suelo es en forma del anión Nitrito (NO_2^-), éste muestra una gran capacidad de óxido-reducción bajo condiciones idóneas de oxígeno y con la ayuda de bacterias específicas para cada proceso, logra convertirse en nitrógeno disponible para las plantas en su forma NO_3^- (MacFaddin, 2003).

Nitratos (NO_3^-)



Figura 18. Determinación de NO_3^- con el uso de HACH/2000.

La determinación para nitratos se llevó a cabo bajo la metodología del laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, basado en el programa 353 de la metodología del DR/2000 Spectrophotometer Handbook.

Nitritos (NO_2^-)

La determinación para nitritos se llevó a cabo bajo la metodología del laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, basado en el programa 371 de la metodología del DR/2000 Spectrophotometer Handbook.

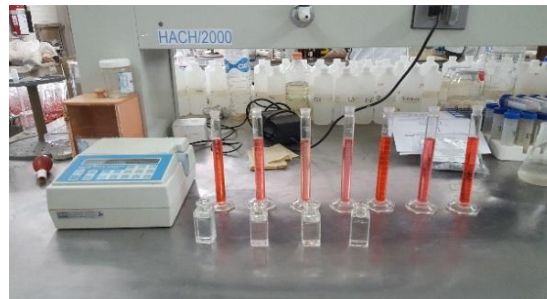


Figura 19. Determinación de NO_2^- con el uso de HACH/2000.

Nitrógeno amoniacal

La determinación para nitrógeno amoniacal se llevó a cabo bajo la metodología del laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, basado en el programa 380 de la metodología del DR/2000 Spectrophotometer Handbook.

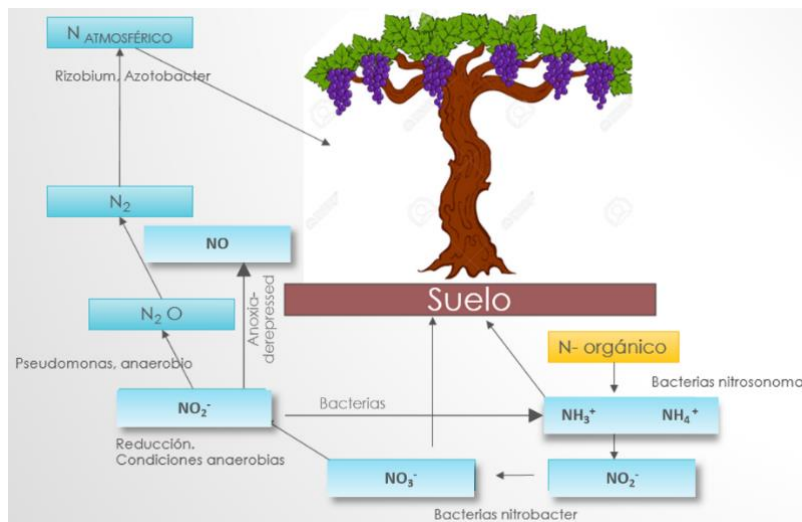


Figura 20. Diagrama del Ciclo del Nitrógeno (MacFaddin, J. 2003).

Sulfatos (SO_4^{2-})

La determinación para sulfatos se llevó a cabo bajo la metodología del laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, basado en el programa 680 de la metodología del DR/2000 Spectrophotometer Handbook.

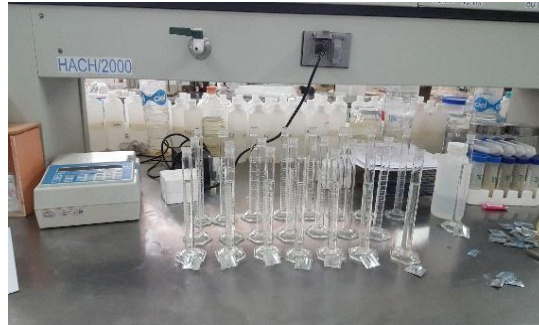


Figura 21. Determinación de SO_4^{2-} con el uso de HACH/2000.

Sodio (Na^+)

Uno de los cationes más comunes en suelo es el sodio, éste presenta un alto grado de solubilidad en agua y sus altas concentraciones en el agua de riego pueden ocasionar la formación de una capa de sales en las redes de riego y al llegar al suelo incrementar la concentración del catión y formar una capa de salitre en casos extremos (SEMARNAT, 2014), además reduce la eficiencia de los drenajes y puede llegar a presentarse un desbalance, déficit hídrico y toxicidad en la planta (SAGARPA-SEMARNAT, 2010).

Para conocer la concentración de sodio en el extracto de saturación del suelo se desarrolló la metodología propuesta en la Norma NOM-021-RECNAT-2000, con el uso de espectrofotometría de flama.

Potasio (K^+)

El ion potasio es el encargado de regular el mecanismo estomático y la presión osmótica en una planta, si se presentan deficiencias de este elemento en la etapa de desarrollo del cultivo se puede afectar la producción de azúcares, la actividad enzimática, la absorción de agua y retrasar el crecimiento de la planta y el fruto (Seguin, 1980; Castellanos *et al.*, 2000).

Para conocer la concentración de sodio en el extracto de saturación del suelo se desarrolló la metodología propuesta en la Norma NOM-021-RECNAT-2000, con el uso de espectrofotometría de flama.



Figura 22. Espectrofotómetro de flama utilizado para la determinación de Na^+ y K^+ .

Dureza total

Esta variable se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, y es la responsable de la formación de incrustaciones en tuberías, generando fallas y pérdidas en la eficiencia del riego. La determinación de la dureza total se desarrolló bajo la metodología de titulación de la solución, propuesta en la Norma NOM-44-072-SCFI-2001.



Figura 23. Determinación de dureza total con el método de titulación volumétrico.

Calcio (Ca^{2+})

El calcio es un nutriente que forma parte de los elementos secundarios, es esencial en la estructura del suelo y en el desarrollo de la planta. El calcio es el catión intercambiable más dominante y es uno de los que presenta un alto grado de lixiviación en presencia de fuertes lluvias o riegos abundantes. Un cultivo perenne e intensivo como la vid, llega a causar la remoción de grandes cantidades de nutrientes en su mayoría calcio, magnesio y potasio.

Para la determinación de calcio se desarrolló la metodología de titulación del extracto, propuesto por el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



Figura 24. Determinación de Ca^{2+} con el método de titulación volumétrico.

Magnesio (Mg^{2+})

EL ion magnesio presenta un alto grado de solubilidad de modo que logra lixiviarse seguido de lluvias torrenciales o riegos prolongados, este comportamiento es más frecuente en suelos ácidos y arenosos (Agrolab, 2005), a causa de un suelo pobre en magnesio se presenta una deficiencia en las hojas viejas de las plantas que es fácil de identificar al observar una clorosis desarrollada entre las nervaduras de la hoja, además se desarrolla una necrosis en la zona clorótica (Molina, 2001; INIA, 2017). El magnesio es un microelemento fundamental en el desarrollo de la planta y tiene participación en la absorción y migración del fósforo, mejorando la captación de hierro en la planta (Valdés y Palma, 2017).

El magnesio soluble fue cuantificado mediante la diferencia de la variable dureza total menos el contenido de calcio de la muestra, metodología propuesta por el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Carbonatos (CO_3^{2-})

En suelos de clima árido la presencia de alto contenido de carbonatos es una condición natural, sin embargo, trae consecuencia en algunos casos, como la deficiencia de hierro en la planta (Valdés y Palma, 2017).

Para la determinación de carbonatos se trabajó con la metodología de titulación volumétrica para la determinación de carbonatos en el extracto, basado en la metodología propuesta por el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. En el análisis de suelo y agua de la zona de estudio no hubo presencia de carbonatos.



Figura 25. Determinación de CO_3^{2-} con el método de titulación volumétrica.

Bicarbonatos (HCO_3^-)

En muchos de los casos la presencia de un elevado contenido de bicarbonatos en el suelo y en el agua de riego puede estar relacionada con el desarrollo de clorosis en las hojas de la planta, siendo considerada como un síntoma de salinidad (SAGARPA-SEMARNA, 2010). El ion bicarbonato puede encontrarse en suelos con un rango amplio de pH, desde 4.5 hasta 8.2 y la presencia de altas concentraciones de HCO_3^- afecta directamente la nutrición de Hierro en las plantas (Sierra *et al.*, 2001).

La metodología utilizada para la cuantificación del bicarbonato en la solución fue por titulación volumétrica, misma que fue propuesta por el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.



Figura 26. Determinación de HCO_3^- con el método de titulación volumétrica.

Cloruros (Cl^-)

El ion cloruro es un nutriente clave en el desarrollo de un cultivo, sin embargo, en exceso en el agua de riego conduce a la salinización del suelo con un aumento excesivo de la conductividad eléctrica; alta concentración de cloruros en suelo puede producir toxicidad en la planta, ésta se manifiesta como muerte del tejido del borde y del ápice de las hojas, mientras que una toxicidad media produce clorosis en la hoja (Sierra *et al.*, 2001).

La cuantificación de cloruro en el extracto se trabajó con la metodología propuesta por el laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, titulación volumétrica.

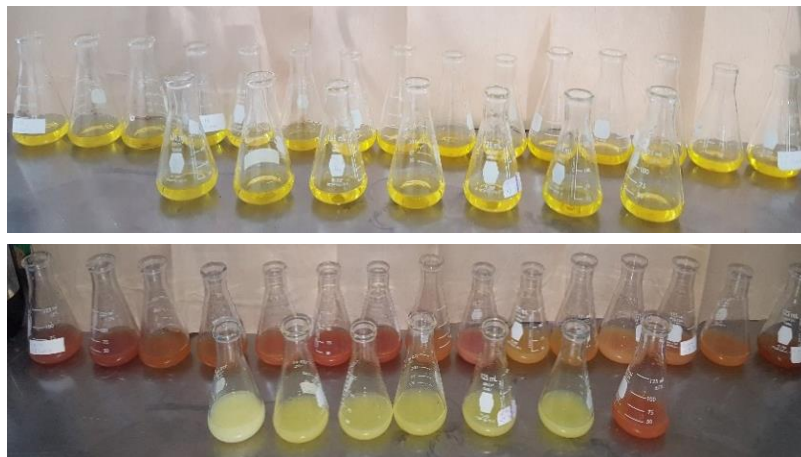


Figura 27. Determinación de Cl^- con el método de titulación volumétrica.

2.1.4 Análisis geoestadístico y mapas esquemáticos

La Geoestadística se refiere al estudio de muestras de fenómenos regionalizados en el espacio, los cuales presentan una organización y estructura; el estudio se desarrolla mediante modelos aleatorios teniendo en cuenta el sentido espaciotemporal de la probabilidad (Martínez y Ramírez, 2005; Montero y Larraz, 2008; Taboada y Cotos, 2005).

La metodología geoespacial se utiliza en la resolución de problemas en muchos campos, en los que se destaca la geología, hidrología, ecología, ciencias medioambientales, meteorología, recursos mineros, geografía, astronomía y agronomía (Taboada y Cotos, 2005).

Uno de los procedimientos geoestadísticos de estimación espacial es el Kriging, éste se encarga de estimar una superficie a partir de un conjunto de puntos dispersos con valores y es una herramienta efectiva que ajusta una función matemática a un número específico de puntos dentro de un radio esperado, con el objetivo de determinar un valor estimado de salida para cada ubicación, además implica una interacción espacial con el comportamiento del fenómeno (ArcGIS Pro, 2018).

Las variables analizadas en las muestras del extracto de saturación del suelo se trabajaron con el método de interpolación Kriging con el objetivo de obtener valores de estimación espacial a lo largo de toda la zona de estudio y lograr analizar el comportamiento de los nutrientes en suelo.

Para llevar a cabo la estimación con Kriging se analizaron las reglas de dependencia, entre ellas la creación de variogramas y análisis de covarianza, posteriormente se realizaron predicciones con diversos modelos matemáticos para determinar el modelo que presentara un mayor ajuste a los datos en estudio, una vez determinado el modelo más ajustado a la variable de interés se realizó la representación de la información en mapas esquemáticos para su apropiada interpretación.

Determinación de textura

En el análisis de textura de la Finca 1 se determinaron cuatro tipos, la textura de suelo **franco** es la que se presenta en mayor porcentaje, cubriendo el 55% de la zona en estudio, siendo un suelo que presenta granos moderadamente arenosos y en su estado húmedo se presenta ligeramente cohesivo y se adhiere moderadamente a los dedos; la textura **franco arenosa** representa el 30% del suelo analizado, siendo un suelo de carácter granular no pegajoso a los dedos en su estado húmedo; el suelo con textura **franco arcillo arenosa** representa el 10% del suelo analizado y se caracteriza por ser de superficie áspera y moderadamente brillante después de frotarse entre los dedos y al tacto es notable la presencia de gránulos medios a gruesos; el suelo de textura **franco arcillosa** representa únicamente un 5% de suelos de la Finca 1, siendo un suelo de carácter poco granular, así mismo presenta plasticidad moderada y una superficie poco brillante después de ser frotado entre los dedos.

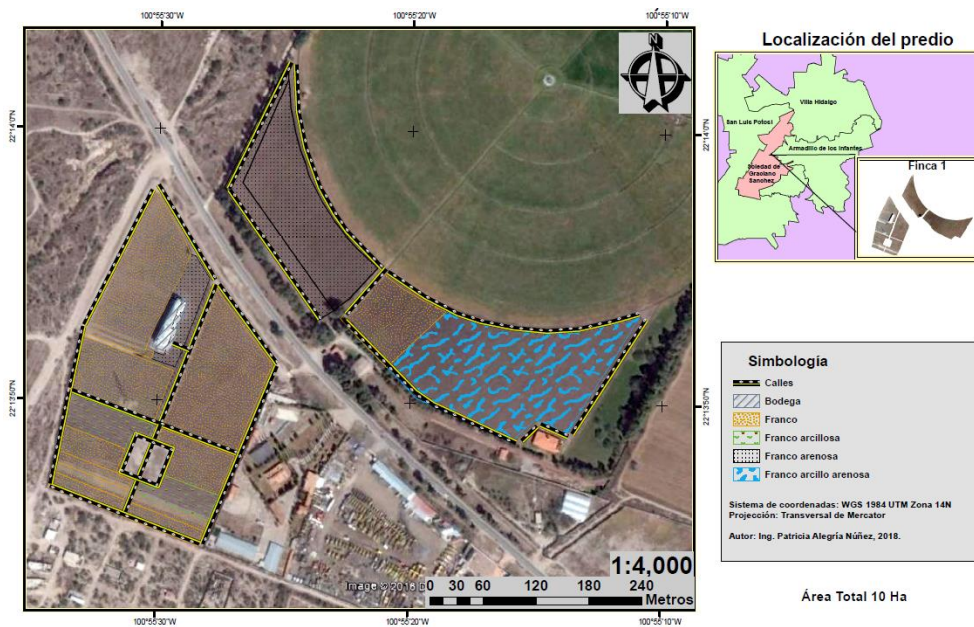


Figura 28. Caracterización de tipo de textura en la Finca 1.

La Finca 2 mostró en la determinación de textura tres tipos de suelo; el suelo de textura **franco** es el que cubre el 70% del área de estudio, mientras que el suelo con textura **franco limosa** representa el 20% del total de la zona y únicamente el 10% corresponde al suelo con textura **franco arcillosa**. Un suelo con textura franco limosa presenta una sensación harinosa con ligeros gránulos al tacto sin ser cohesiva en estado húmedo.

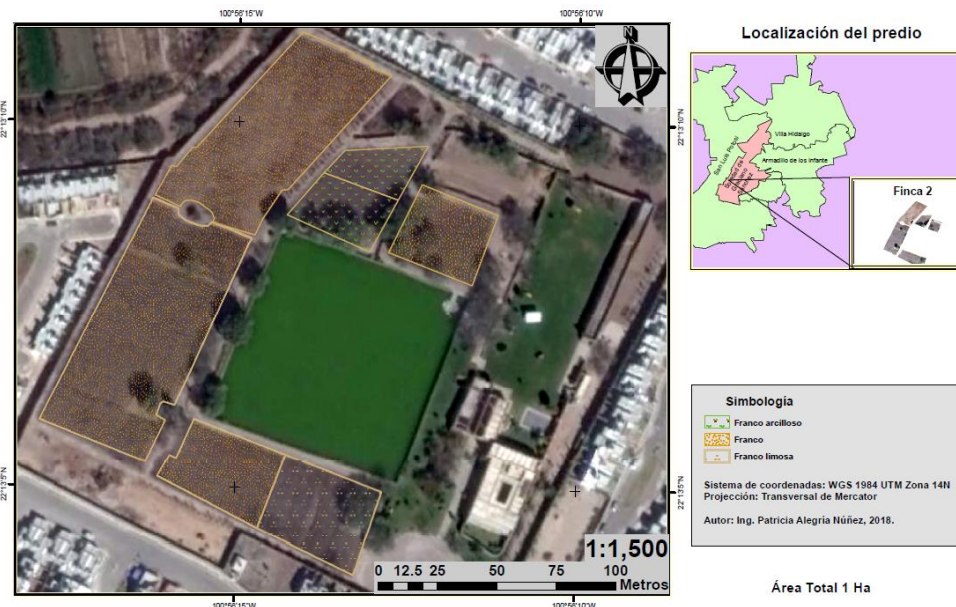


Figura 29. Caracterización de tipo de textura en la Finca 2.

La presencia de fragmentos rocosos en ambas zonas productivas no sobrepasa en 10 % en toda el área de estudio y se presentan en su mayoría en gravas de tamaño medio con intemperismo parcial.

Determinación de pH

Cada cultivo demanda un rango de pH ideal para su óptimo desarrollo, de manera que, si éste se encuentra por abajo o por encima del rango ideal, el crecimiento de la raíz de la planta se ve reducido, afectando el desarrollo y el rendimiento del cultivo, además de afecta directamente en la nutrición del cultivo.

Los suelos más óptimos para la producción de vid para vino son aquellos que presentan un valor de ph entre 5.5 y 7.5, ya que bajo esta condición se alcanza un equilibrio en la descomposición de la materia orgánica y la correcta disolución de los nutrientes, seguido de una apropiada absorción por las raíces de la planta (Hidalgo, 2006).

El suelo de las fincas en estudio, mostraron un rango de pH que va de 5.0 a 6.6, encontrándose en un rango ideal según lo propuesto por García 2008 y Bernier 2006, sin embargo, Hidalgo J, en el 2006 publica en su libro “La calidad del vino desde el viñedo”, que los suelos con pH por debajo de 5.5 presentan baja disponibilidad de potasio, fósforo, boro, calcio, cobre y molibdeno, ya que son muy poco solubles y la planta no puede absorberlos, las deficiencias de éstos nutrientes en suelo se ven reflejados en la planta a mediano plazo, por otra parte, se incrementa la absorción de hierro, zinc, aluminio y manganeso, intoxicando de manera directa a la planta, ya que son elementos muy solubles por debajo de éste pH.

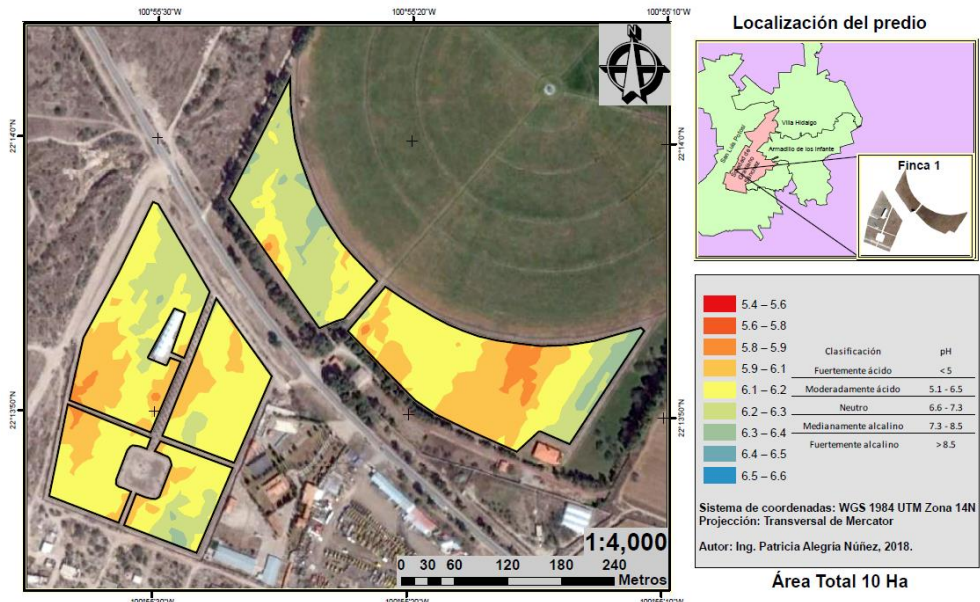


Figura 30 . Variabilidad de pH de suelo en la Finca 1.

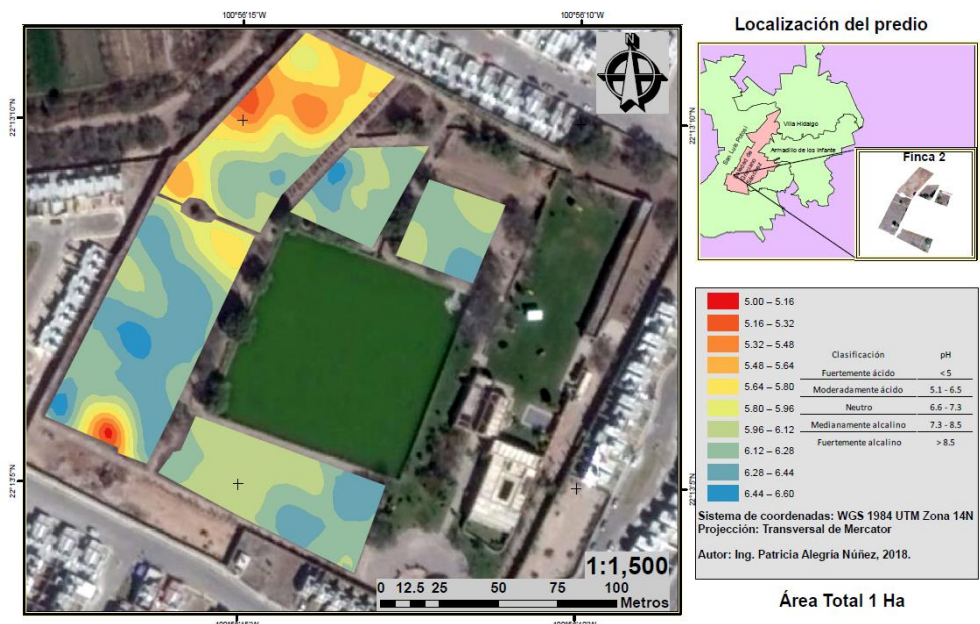


Figura 31. Variabilidad de pH de suelo en la Finca 2.

Determinación de Conductividad Eléctrica (CE)

La CE del suelo está en relación a la concentración de sales presentes en él, las cuales expresan el grado de salinidad. Las sales pueden proceder de la meteorización de los minerales y rocas, de la fertilización en exceso y del agua de riego, de manera que los elementos que participan en la salinidad son: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Cloro y Azufre.

El alto contenido de sales en el suelo da lugar a que la planta invierta mayor energía en la absorción del agua del suelo y llegue más rápido a su punto de marchitez permanente (PMP), un cultivo puede sobrevivir en suelos salinos, sin embargo, la salinidad afecta directamente en el rendimiento del mismo (MAG, 2004).

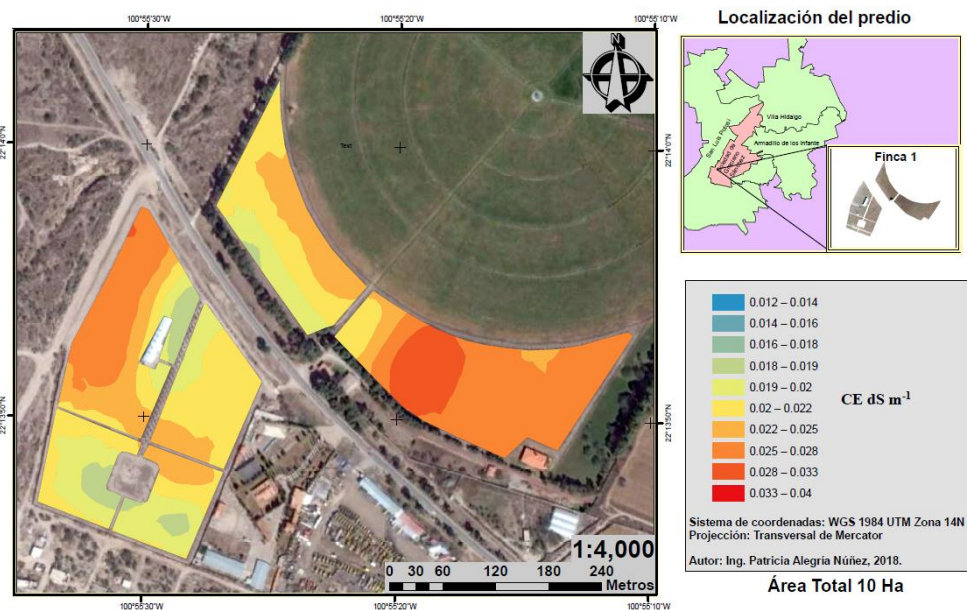


Figura 32. Variabilidad de CE de suelo en la Finca 1.

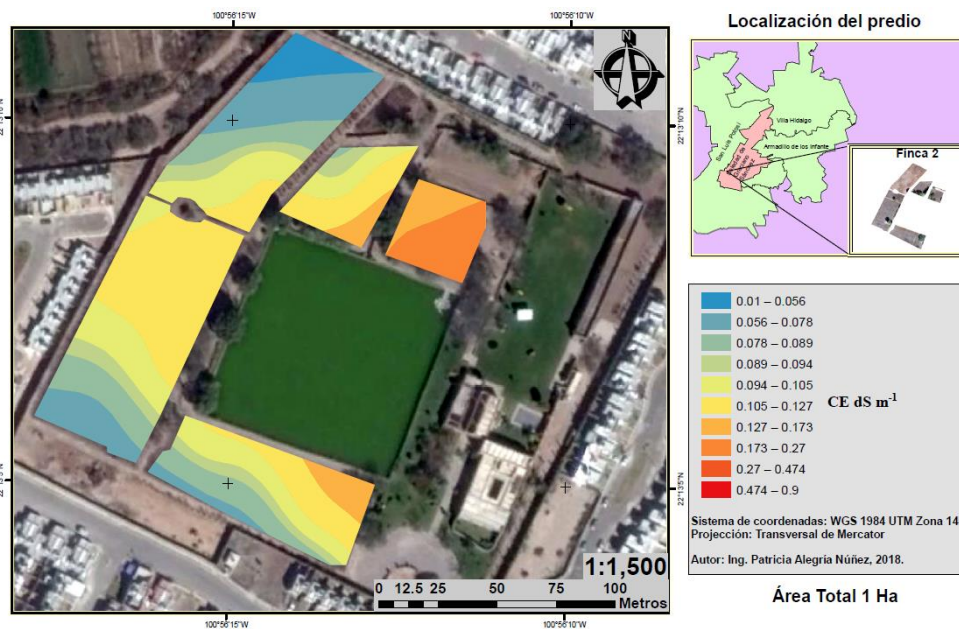


Figura 33. Variabilidad de CE de suelo en la Finca 2.

En el caso del cultivo de vid, ésta presenta una tolerancia moderadamente sensible a la salinidad en los suelos en donde se desarrolla, con un límite de tolerancia cuando el suelo presenta 1.50 dS/m, ya que requiere de un grado de estrés hídrico a lo largo de su etapa productiva y el grado de tolerancia medio, propicia un rango de estrés apropiado aunado a un déficit de riego (Del Valle, 1992).

Ambas fincas en estudio muestran un grado de salinidad en el extracto del suelo por debajo de 1 dS m⁻¹, categorizándose con efectos despreciables de salinidad, según lo marca la Norma NOM-021-RECNAT-2000 (Cuadro 3).

Materia orgánica

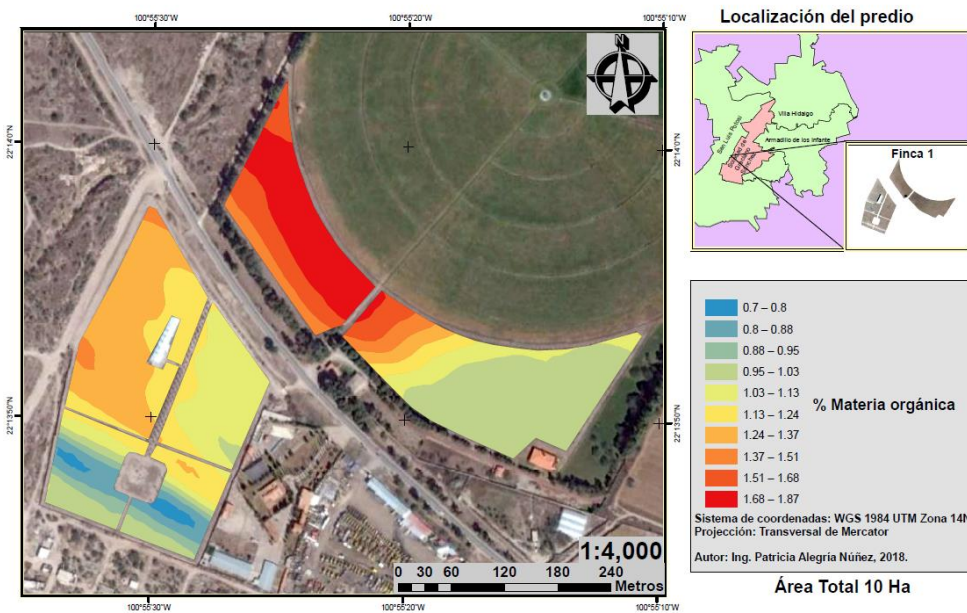


Figura 34. Variabilidad de la concentración de materia orgánica del suelo en la Finca 1.

La materia orgánica es expresada en porcentaje y ésta puede dar lugar a un aumento en el contenido de nutrientes y contribuir en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) en el suelo, así mismo, logra favorecer la microestructura del suelo y es una materia importante que contribuye en evitar la erosión del mismo. El contenido de materia orgánica en el suelo de las dos fincas en estudio muestra concentraciones menores al 2%, categorizándose por la Norma NOM-021-RECNAT-2000 como una concentración muy baja (Cuadro 4).

En la producción de vid bajo el rigor agroecológico es fundamental el aporte de la materia orgánica, pues ésta sustituye la fertilización química, mientras que en la producción convencional de la vid la aplicación de materia orgánica no es una prioridad cuando se tienen condiciones de pH ideal (5.5 a 7.5), ya que ésta contribuye a eliminar los iones H⁺; sin embargo, cuando el pH del suelo está por debajo de 5.5, la adición de materia orgánica es una de las opciones de corrección de pH (Hidalgo, 2006; Hidalgo, 1994).

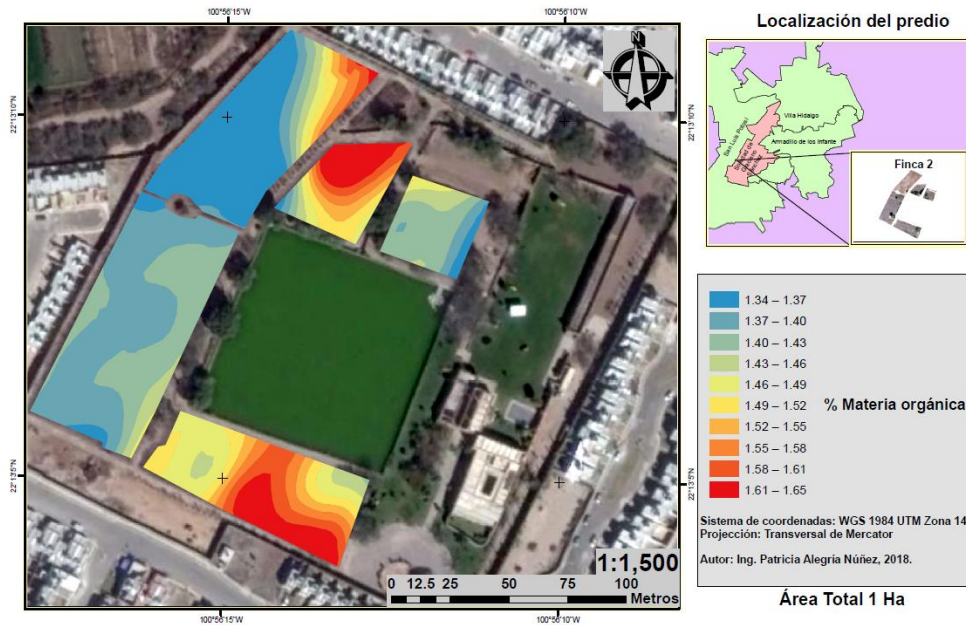


Figura 35. Variabilidad de la concentración de materia orgánica del suelo en la Finca 2.

Nitrógeno Inorgánico

Nitratos (NO_3^-)

El nitrógeno en forma de nitratos es directamente asimilable por las plantas en suelos con pH por debajo de 6 (Valdés y Palma, 2017), sin embargo, presenta un alto grado de solubilidad y es altamente lavable en profundidad, es por esto que la aplicación de éste ion al suelo debe ser controlada, es decir debe aplicarse solamente la cantidad necesaria en cada ciclo de producción (Garrido, 1994).

La deficiencia de nitrógeno en la planta provoca una insuficiencia del área foliar y las hojas muestran un color que va desde un verde pálido hasta amarillento (Ojeda *et al.*, 2012), además de dar pie a una maduración tardía del fruto, éste comportamiento tiende a ser más visible en plantas de vid y kiwi, pues éstas tienen una baja capacidad de absorción del nitrógeno por la raíz y solo el 20% o 30% del nitrato absorbido es traslocando al xilema (Valdés y Palma, 2017).

La mejor forma de determinar una deficiencia o suficiencia de nitrógeno en el cultivo de la vid, es mediante un análisis foliar durante el proceso de floración y envero, en el que se espera encontrar como valores ideales de nutrición de 8.0 a 11.0 g de Nitrógeno/ Kg^{-1} (Ojeda *et al.*, 2012).

Respecto a la concentración establecida por Agrolab, la Finca 1 muestra un grado de suficiencia de NO_3^- (41 – 120 mg/L) en al menos el 40% del total de su área, mientras que el 60% restante está catalogado como un rango bajo de concentración de nitratos en el suelo (<40 mg/L); mientras que la Finca 2 presenta un 50% de rango de suficiencia y un 50% de deficiencia de nitratos en suelo.

Cuadro 5. Rango de concentración de Nitratos en suelo (Agrolab, 2005).

Rango	Mg/L Nitratos
Bajo	<40 mg L
Suficiente	41 – 120 mg L
Alto	>121 mg L

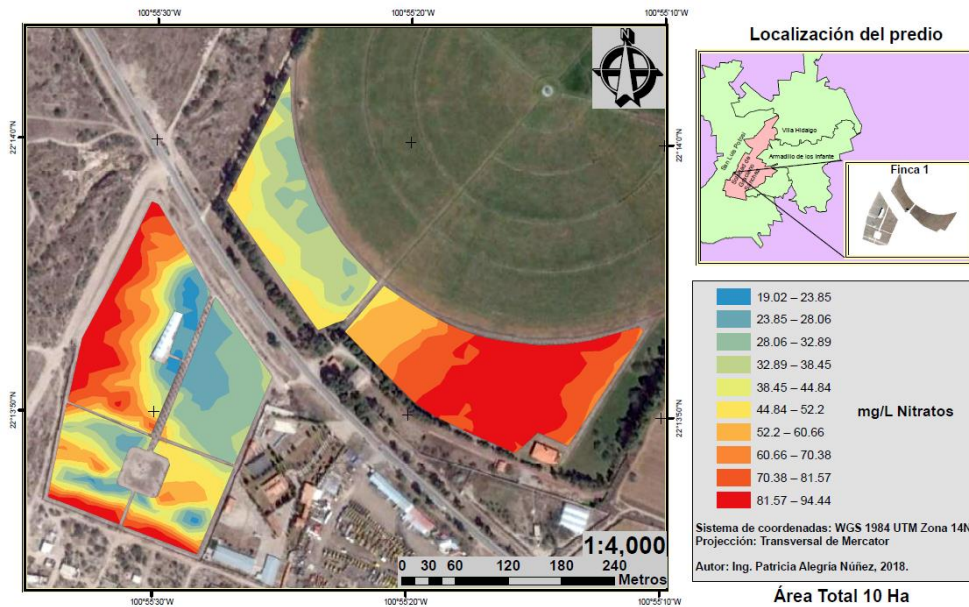


Figura 36. Variabilidad de la concentración NO_3^- del suelo en la Finca 1.

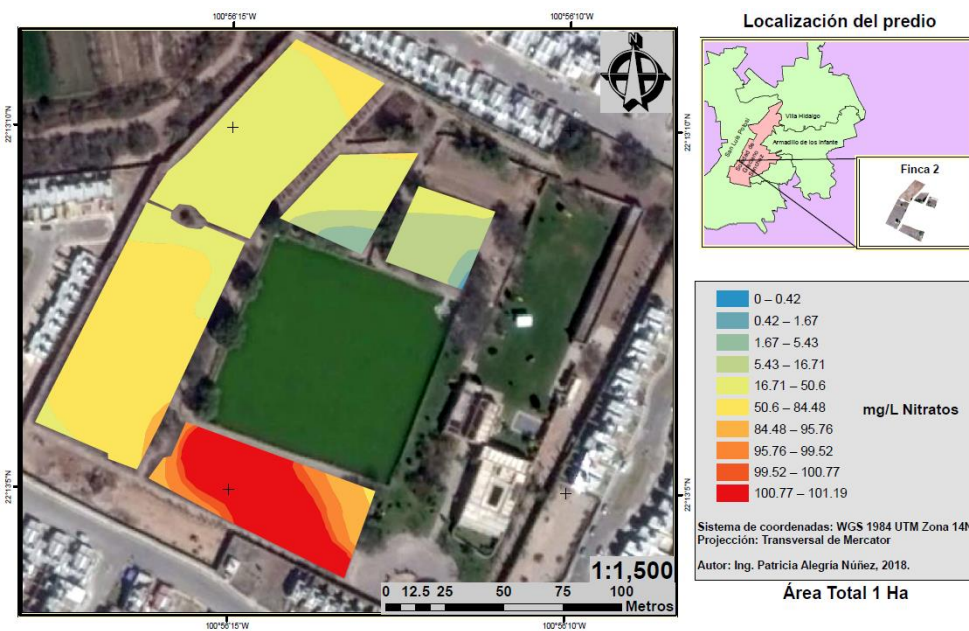


Figura 37. Variabilidad de la concentración de NO_3^- del suelo en la Finca 2

La alta concentración de nitratos en diversos bloques de la Finca 1, puede atribuirse al suelo franco arcillo arenoso que se presenta en esa zona, ya que éste ion suele acumularse en suelos con contenido de arcillas y compactados, lo cual no determina la disponibilidad del nitrógeno, mientras que la baja disponibilidad de nitratos se atribuye a que, en un suelo con alto contenido de arenas los nitratos se lixivian rápidamente (Espinoza *et al.*, 2006).

En la Finca 2, en el bloque que muestra un grado de suficiencia de nitratos se presenta un suelo franco y franco limoso con un grado medio de compactación, mientras que en el bloque que muestra la insuficiencia más baja presenta un porcentaje de arena del 48% y un trabajo de rastreo constante del suelo.

Nitritos (NO_2^-)

Los nitratos aun estando presentes en el suelo no se encuentran disponibles para la absorción por la planta, éstos se encuentran en constante cambio dentro del ciclo del nitrógeno, oxidándose a nitratos o reduciéndose a amonio, para de estas formas ser asimilable para la planta (MacFaddin, 2003).

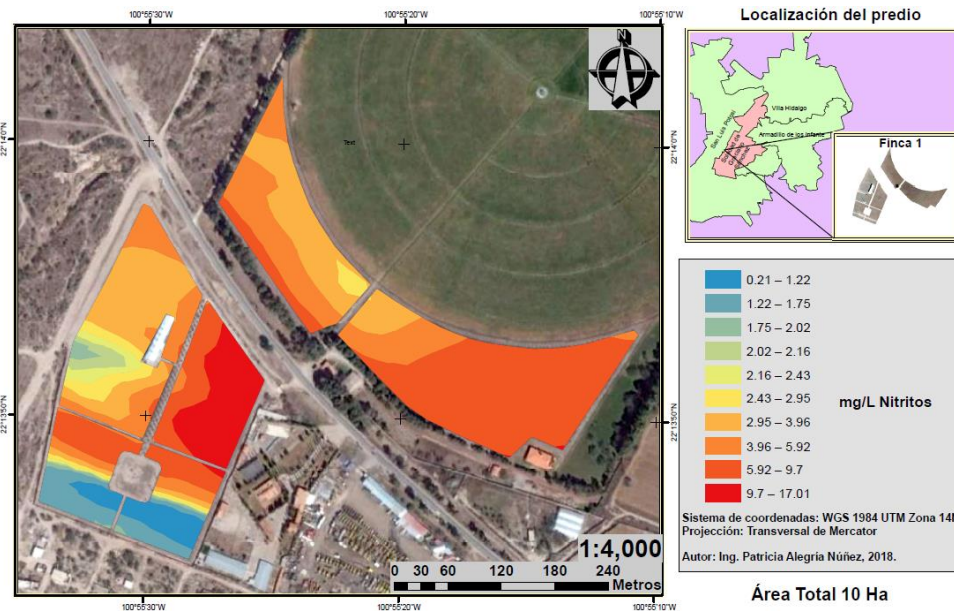


Figura 38. Variabilidad de la concentración NO_2^- del suelo en la Finca 1.

La presencia de nitritos en el suelo garantiza la formación de un ion asimilable (NO_3^- y NH_4^+) para la planta en un inmediato y corto plazo, ya que las reacciones de óxido – reducción están siempre en constante actividad en el suelo, siempre y cuando las condiciones ideales de humedad, oxigenación y bacteriana se encuentren presentes en el suelo (MacFaddin, 2003).

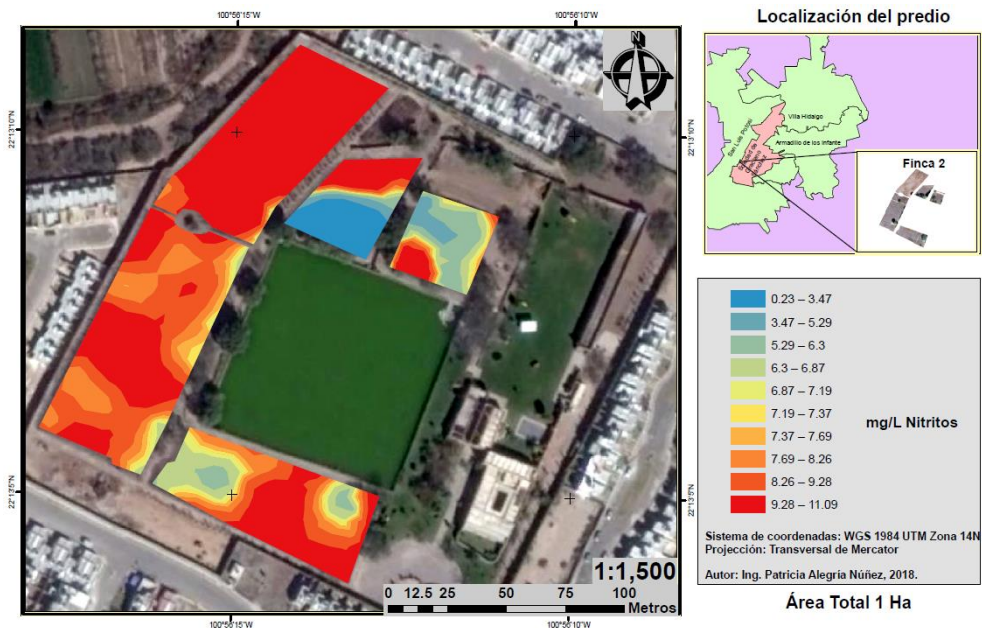


Figura 39. Variabilidad de la concentración NO_2^- del suelo en la Finca 2.

Nitrógeno amoniacal (NH_4^+)

El nitrógeno en forma de amonio se encuentra en un estado asimilable por la planta y es más fácilmente absorbido en suelos que presentan un pH mayor a 6 (Valdés y Palma, 2017).

La concentración de amonio en el suelo de la Finca 1 se presentan de 0.43 mg/L a 6.63 mg/L, mientras que en la Finca 2, las concentraciones son menores, van de 1.19 mg/L a 3.06 mg/L.

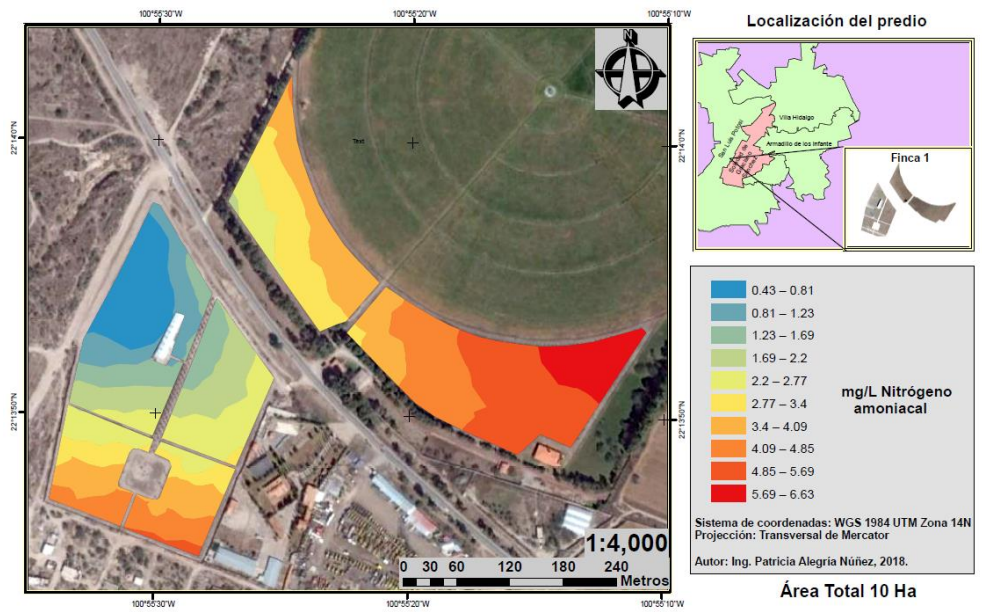


Figura 40. Variabilidad de la concentración de NH_4^+ del suelo en la Finca 1.

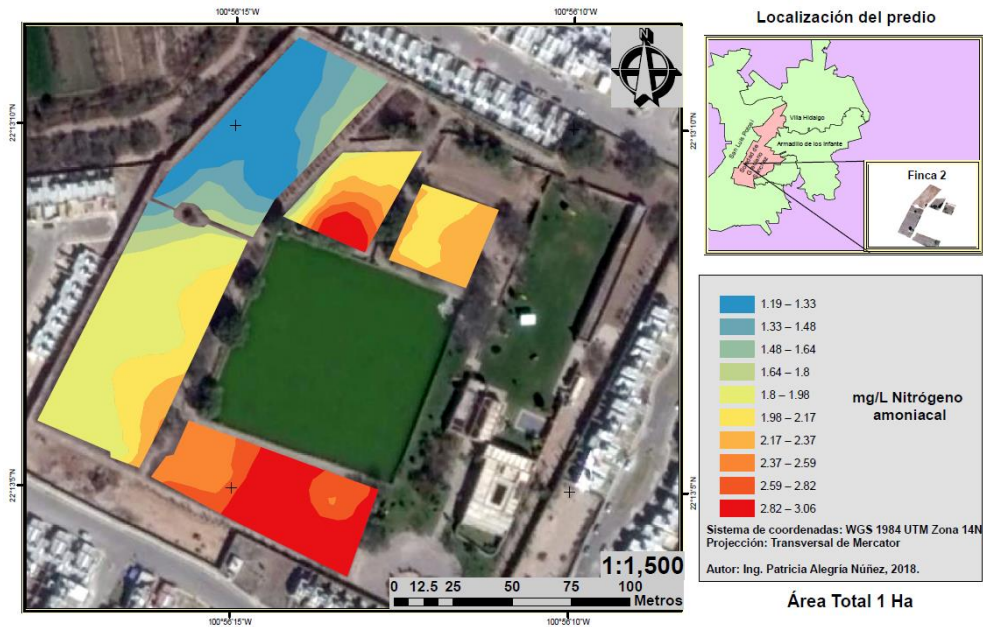


Figura 41. Variabilidad de la concentración de NH_4^+ del suelo en la Finca 2.

Sulfatos (SO_4^{2-})

El sulfato tiene el riesgo de lixiviarse en suelos con presencia de alto contenido de arenas y precipitación elevada o riegos abundantes, tiene la capacidad de acumularse en horizontes de suelos arcillosos o compactados, y su concentración y disponibilidad varía en el suelo a lo largo del tiempo dependiendo de las condiciones ambientales y edafológicas (Espinoza *et al.*, 2006; Agrolab, 2005). La alta acumulación de sales específicamente sulfatos y un mal drenaje de los suelos, dan pie a la formación de suelos sulfatados ácidos (SSA) los cuales se caracterizan por presentar concentraciones mayores a 500 mg/Kg^{-1} (IGAC, 1983; Dent, 1992; Ararat, 1996; Amezcua, 1988; Combatt *et al.*, 2004).

Los constantes procesos de óxido – reducción contribuyen a la acidificación del suelo (Fernández *et al.*, 2011) y la condición de acidez se ve modificada alcanzando un pH menor a 3.5 cuando los suelos son expuestos a riegos abundantes o alta precipitación (Fitzpatrick *et al.*, 1993). El desarrollo de la acidez en la zona de las raíces del cultivo, producto del proceso de óxido – reducción, causa pérdidas en la productividad (Fernández *et al.*, 2011), toxicidad por la elevada solubilidad del aluminio, poca disponibilidad de fósforo, baja saturación de las bases y salinidad (Combatt *et al.*, 2008), además que los escurrimientos ácidos impactan de manera adversa al ambiente (Fernández *et al.*, 2011).

La concentración de sulfatos en suelo de la Finca 1 es de 63.5 mg/L a 1098.9 mg/L , con condiciones de acidez de 5.5 a 6.6 (moderadamente ácido), la Finca 2 presenta un rango mayor de concentración de sulfatos en suelo, el cual va de 276 mg/L a 1441 mg/L con pH de suelo de 5.0 a 6.6 (fuertemente ácido a moderadamente ácido) categorizando a ambas fincas un suelo sulfatado ácido.

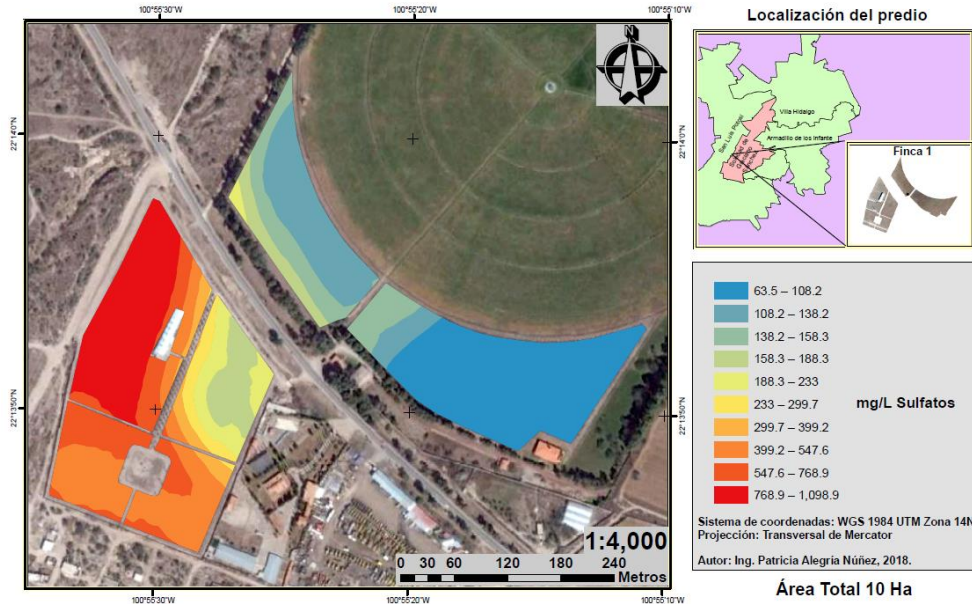


Figura 42. Variabilidad de la concentración de SO_4^{2-} del suelo en la Finca 1.

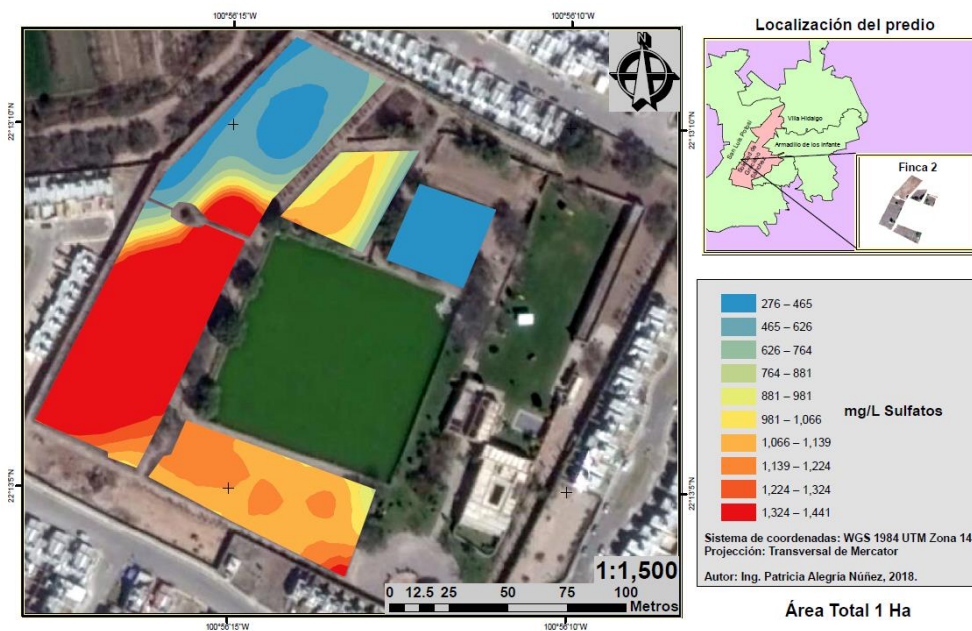


Figura 43. Variabilidad de la concentración de SO_4^{2-} del suelo en la Finca 2.

Sodio (Na^+)

El sodio no es un elemento esencial para el desarrollo de una planta, sin embargo, es importante su análisis pues éste determina la calidad del mismo (Espinoza *et al.*, 2006), de manera que el sodio es el catión más común de encontrar en el suelo y el que presenta mayor grado de solubilidad, además de ser capaz de asociarse a aniones como el cloro, sulfato, carbonato y bicarbonato presentes en el suelo y formar sales (SAGARPA, SEMARNAT, 2010).

Las elevadas concentraciones de sodio afectan negativamente la estructura del suelo, impidiendo la formación de agregados, de manera que, al disminuir la porosidad del suelo, éste se vuelve muy impermeable al agua y al aire (Garrido, 1994).

SAGARPA-SEMARNAT en el 2010, mencionan que por encima de un 25% de sodio en suelo con respecto a los iones de calcio, magnesio y potasio, se presenta un desbalance hídrico promoviendo un déficit e incrementando los riesgos de toxicidad en la planta.

La Finca 1 presentó el 50% del área productiva bajo condiciones por encima el 25% de sodio en el suelo, alcanzando un 42.88% Na^+ , el otro 50% de la zona productiva, muestra un rango por debajo del 25% que va desde 10.33% a 24.38% de sodio.

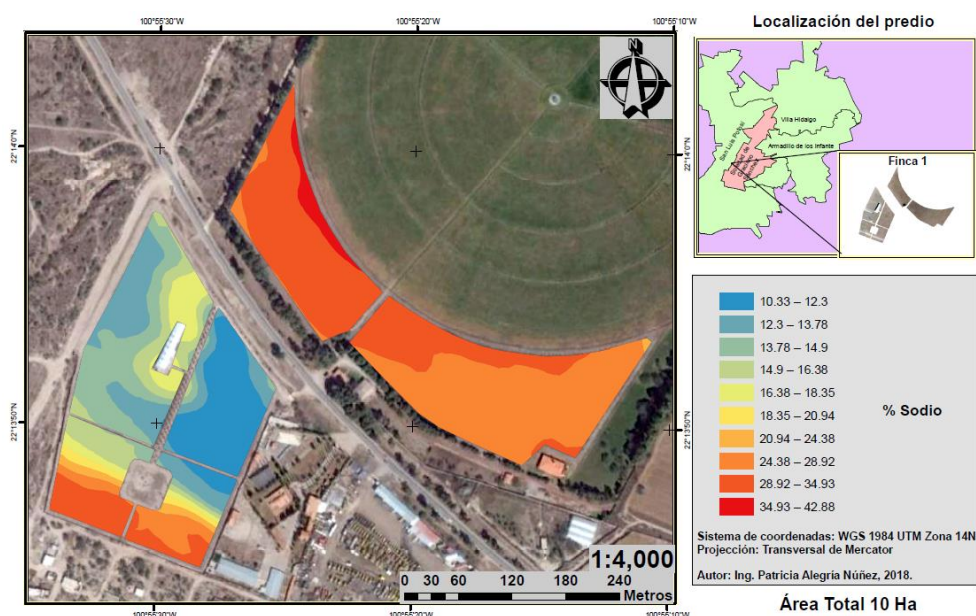


Figura 44. Variabilidad de la concentración de Na^+ del suelo en la Finca 1.

Los resultados del análisis para el caso de la Finca 2, muestran a toda la zona de estudio por encima del porcentaje de sodio ideal que debe presentar un suelo, con un rango que va de 31.14% a 50.42% Na^+ ; el bloque que presentó el mayor grado de concentración de sodio en el suelo (41.62% a 50.42%) es donde se encontraba ubicada la variedad Malbec, misma que fue removida después de la cosecha del 2017 debido a su baja productividad, se infiere que los bajos rendimientos y el desarrollo del cultivo pudo deberse a un grado de toxicidad que mostró la planta debido a un exceso en el contenido del ion sodio en el suelo.

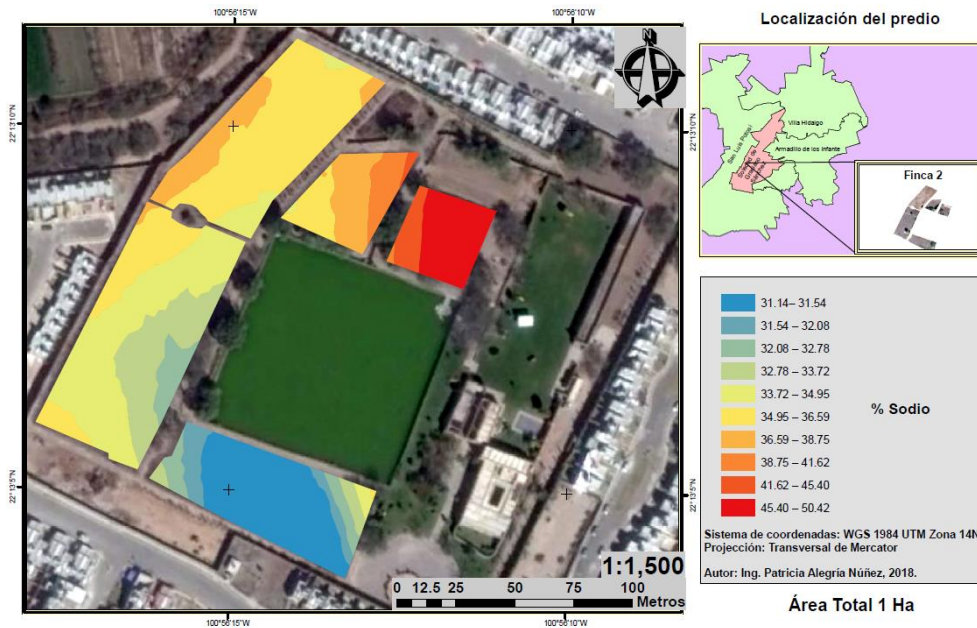


Figura 45. Variabilidad de la concentración de Na^+ del suelo en la Finca 2.

La concentración de sodio en la Finca 1 puede atribuirse a un comportamiento natural propio de la zona de estudio y además al grado de sodio que presente el agua de riego; en la Finca 2 se infiere que el alto grado de concentración de sodio en el suelo se debe a la agrupación de sales presentes en el agua estancada que se usa para el riego, ya que en ésta finca se extrae agua de pozo y se concentra en un estanque previo a su uso, en el estanque se asienta una gran cantidad de sales que están presente en el agua extraída, además el efecto de evaporación del agua incrementa la concentración de las sales, las cuales son vertidas al suelo durante los riegos.

Porcentaje de sodio intercambiable (PSI)

La variable de porcentaje de sodio intercambiable (PSI), representa la cantidad relativa del intercambio del sodio presente en el suelo, misma que está en función de la capacidad del intercambio catiónico (SAGARPA-SEMARNAT, 2010).

La valoración de la sodicidad de un suelo es recomendable, ya que ésta causa hinchamiento y dispersión de las arcillas, reducción de la infiltración, además que el sodio provoca un incremento indirecto del esfuerzo que la planta ejerce en el proceso de extracción de agua del suelo, ésta fuerza es conocida como potencial osmótico (García, 2012). La sodicidad de un suelo se visualiza en su mayoría en suelos arcillosos con pH mayor a 8.5. SAGARPA menciona que el rango ideal de concentración de PSI en suelos debe ser de 0 – 2.5 meq/L y al presentar un valor mayor al 15% PSI con condiciones de pH por encima de 8 es considerado como un suelo sódico.

En ambas fincas de estudio el PSI calculado se establece con menos del 15% de sodio intercambiable, categorizando a ambos suelos como suelos no sódicos y aptos para la producción agrícola. Los valores de PSI para la Finca 1 alcanzan el 4.19%, mientras que en la Finca 2 el porcentaje se incrementa, alcanzando un 6.94% de sodio intercambiable, por lo tanto, no hay riesgo de que se presente sodicidad en los suelos analizados, dicho supuesto se respalda al conocer que los valores de pH para ambas fincas están por debajo de 7.

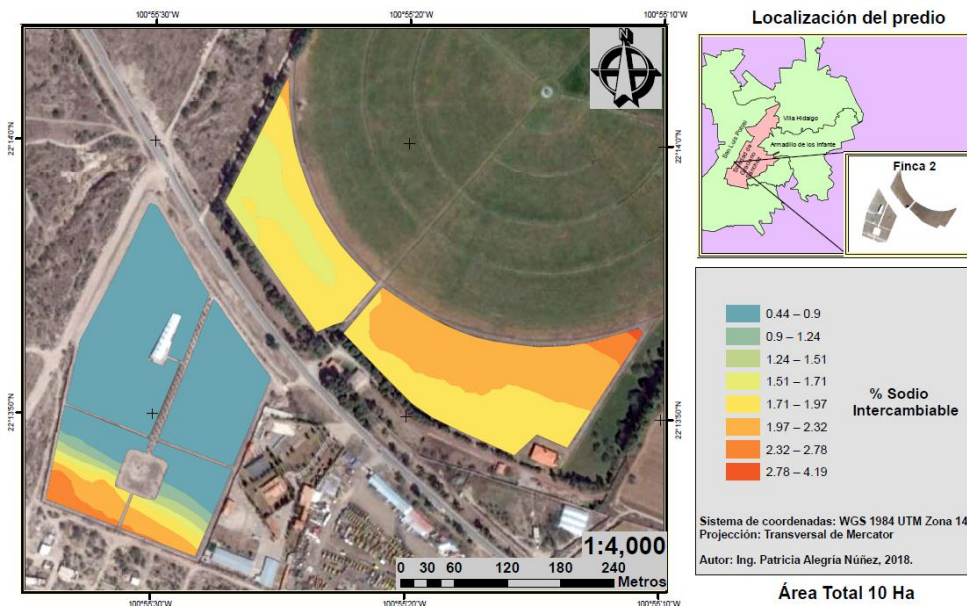


Figura 46. Variabilidad de la PSI del suelo en la Finca 1.

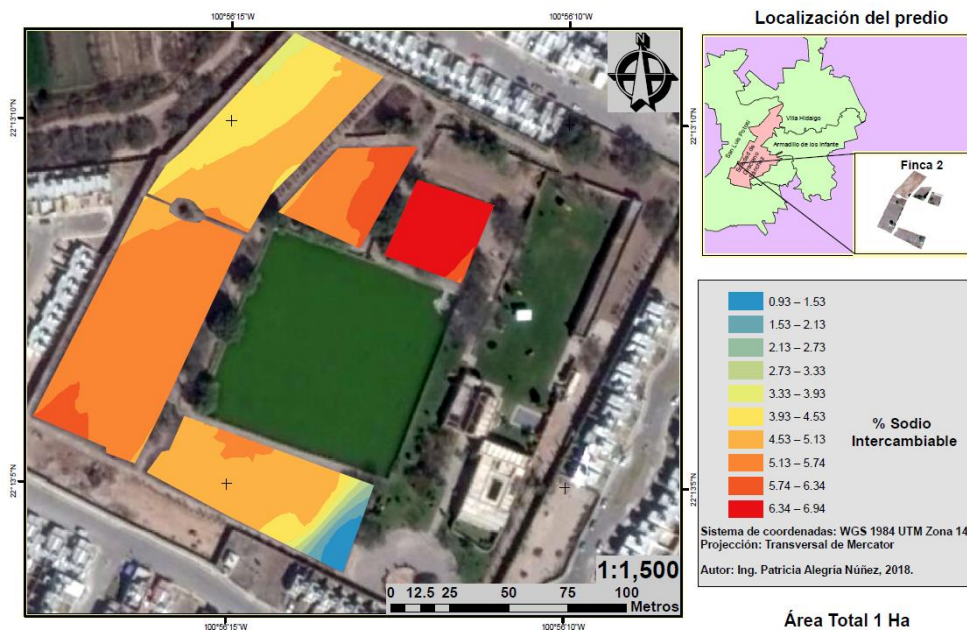


Figura 47. Variabilidad de la PSI del suelo en la Finca 2.

De acuerdo a la clasificación establecida en SAGARPA-SEMARNAT, 2010, los suelos analizados en las dos fincas de estudio se catalogan como un suelo normal, con condiciones de CE por debajo de 4 dS/m^{-1} , con un valor de PSI menor a 15 y pH menor a 7.5, catalogado como un suelo normal, con buena permeabilidad, aireación y buena estructura.

Potasio (K^+)

El potasio es el tercer macronutriente indispensable para un crecimiento óptimo de la planta, logra estimular el contenido de agua en las células e incrementa y regula la presión osmótica. Además, interviene en procesos biológico como la absorción de nitratos y es el encargado de regular el mecanismo estomático para una velocidad apropiada de la transpiración. Por lo anterior es un elemento fundamental en todos los procesos de absorción de agua y esencial en una viña (Villarías *et al.*, 2011; Espinoza *et al.*, 2006).

Si se presentan deficiencias de potasio en la planta, se minimiza la producción de azúcares, la absorción de agua se ve afectada, la actividad enzimática se reduce y con esto el crecimiento de la planta y el fruto se retrasa (Seguin, 1980; Castellanos *et al.*, 2000). Se establecen valores de rangos en concentración de potasio en suelo por Seguin, Castellanos y Espinoza, en los que se determinan concentraciones apropiadas en suelo, oscilando entre 180 mg/L a 800 mg/L.

Cuadro 6. Rango de concentración de K^+ en suelo.

Rango	Potasio mg/L
Bajo	<150
Medio	150 – 250
Alto	250 – 800
Muy alto	>800

La deficiencia de potasio en el viñedo, se muestra con un porte achaparrado en las cepas, entrenudos cortos y raquítrico crecimiento de las yemas axilares, además que las hojas comienzan a necrosarse y a plegarse, comenzando por los bordes (Villarías *et al.*, 2011).

La Finca 1 mostró en los análisis una deficiencia de potasio en casi la totalidad de la zona productiva, registrando valores de concentración muy por debajo del rango ideal de suficiencia y solo una sección de la zona de estudio presenta valores ideales para la producción, tal sección se localiza en el lote ubicado a espaldas de la bodega, siendo que aquí se concentra una parte de las variedades Pinot Noir y Merlot, de manera que se registraron concentraciones de potasio de 138.6 mg/L a 224.82 mg/L.

En la Finca 2 se presentó una suficiencia de potasio en suelo en solo el 30% de la zona productiva, encontrando valores de concentración que van desde 250.18 mg/L hasta 398.94 mg/L de potasio y el 70% restante de la zona cuenta con insuficiencia de éste elemento.

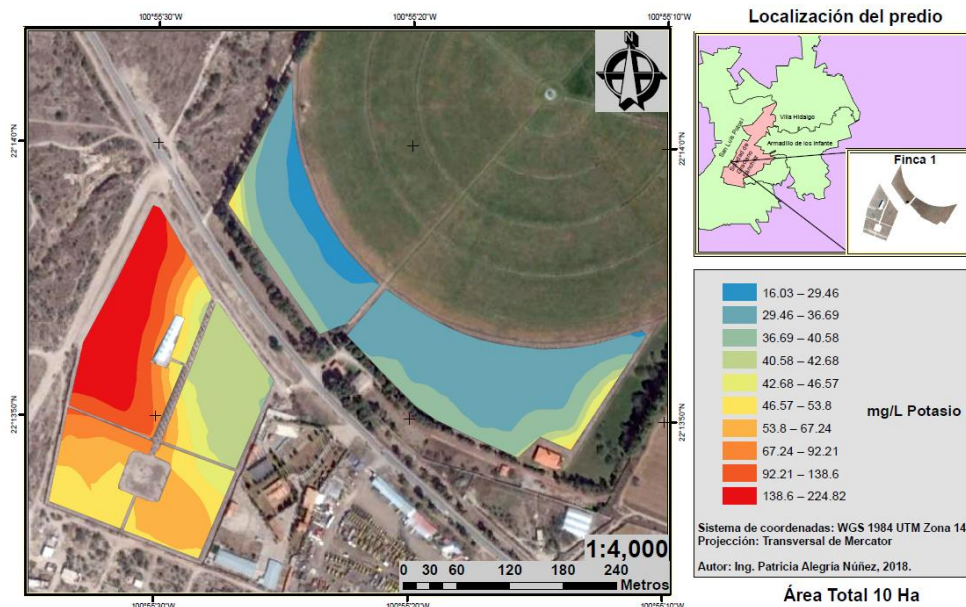


Figura 48. Variabilidad de K^+ del suelo en la Finca 1.

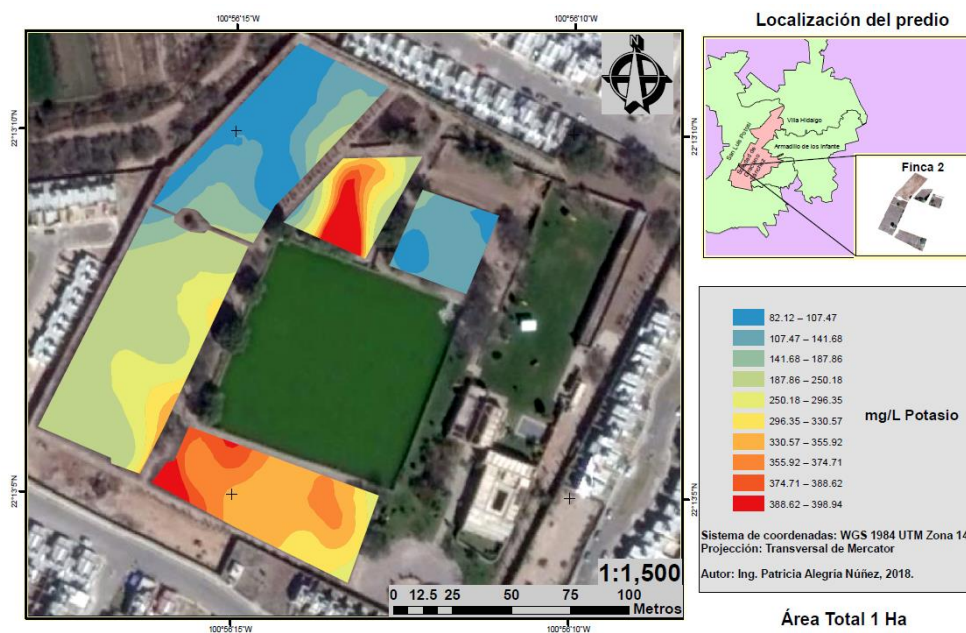


Figura 49. Variabilidad de K^+ del suelo en la Finca 2.

Magnesio (Mg^{2+})

El magnesio es un elemento secundario, forma parte de la clorofila, la que es esencial para la fotosíntesis en la planta, éste elemento es necesario para la absorción de otros nutrientes y actúa como portador de fósforo (Espinoza, 2006; Valdés, 2017). El magnesio es móvil dentro del floema y se transporta a los tejidos más jóvenes, es por esto que la deficiencia se manifiesta primeramente en los tejidos más viejos de la planta (Valdés y Palma, 2017).

La mayoría de suelos arenosos tienen concentraciones menores a 400 mg/L, los suelos arcillosos generalmente contienen arriba de 2500 mg/L (Espinoza *et al.*, 2006). Agrolab determinó rangos de magnesio en suelo para determinar el estatus de su concentración.

Cuadro 7. Rango de concentración de Mg²⁺ en suelo.

Rango	Magnesio mg/L
Bajo	60
Medio	60 – 80
Alto	>180

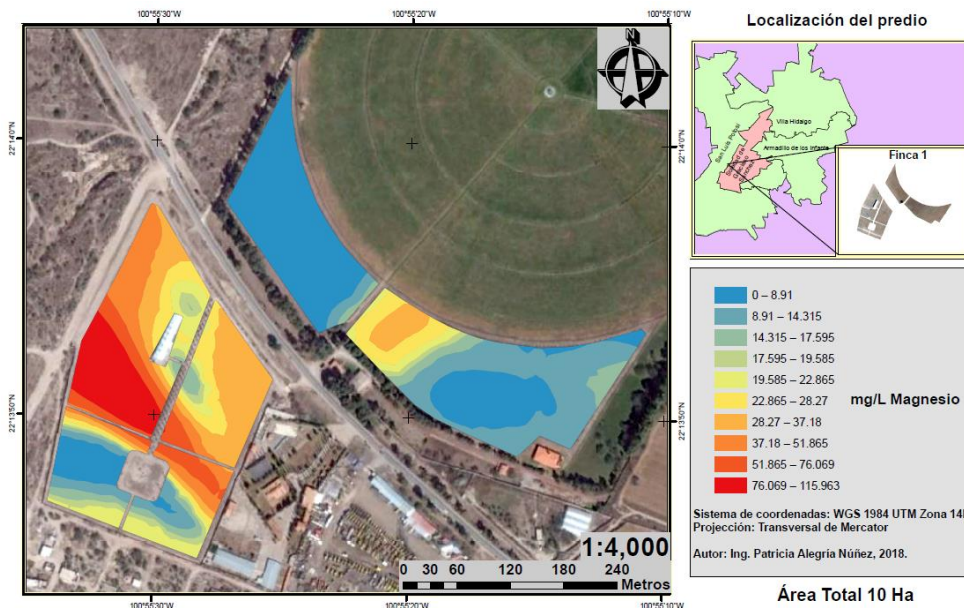


Figura 50. Variabilidad de Mg²⁺ del suelo en la Finca 1.

La Finca 1 muestra una concentración media de magnesio en el 90% del total de la zona de estudio con respecto a la determinación de Agrolab, el 10% restante mantiene un rango alto de magnesio en el suelo, cabe mencionar que en las fincas de estudio se hacen correcciones de deficiencia de magnesio con aplicaciones foliares en el 100% de la plantación.

La Finca 2 muestra un 10% de suficiencia y el 90% restante presenta deficiencia de magnesio en suelo. El grado de deficiencia en ambas zonas de estudio se presenta mayoritariamente en suelos con un contenido medio de arenas (Espinoza *et al.*, 2006).

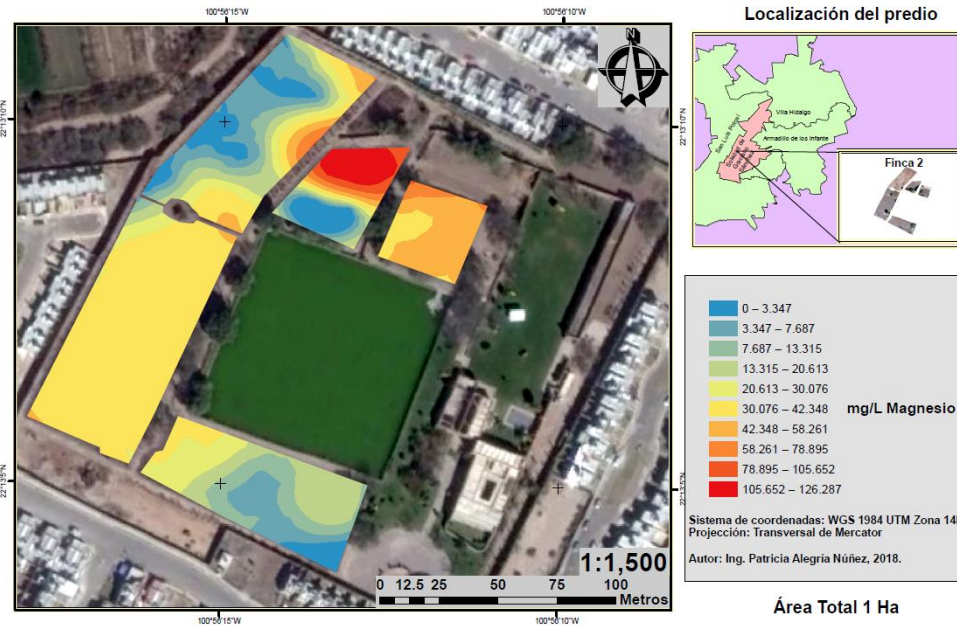


Figura 51. Variabilidad de Mg^{2+} del suelo en la Finca 1.

Carbonato de sodio residual (CSR)

El peligro de sodificación de un suelo y el riesgo de reacción del sodio con otros elementos se incrementa cuando existe presencia de carbonatos o bicarbonatos en él, además la presencia de precipitación favorecer la reacción entre el calcio y el magnesio que se encuentra en el suelo, volviéndose predominantes en el sistema y dando pie a la compactación del suelo y con esto dificultando la infiltración del agua, aire y la penetración de las raíces (Fabio y Marano, 2014; Eaton, 1950).

Cuando los valores de CSR son positivos se asume que el calcio y el magnesio se precipitan al reaccionar con los carbonatos y bicarbonatos, de esta manera la única sal presente en la solución del suelo es el sodio, generando la disponibilidad de otros iones tóxicos para la planta, de manera que cuando los valores de CSR se presentan de manera negativa, el suelo o el agua de riego en estudio son aptos para la producción agrícola (Medina *et al.*, 2016).

Ambas fincas en estudio no presentan ningún riesgo a desarrollar suelos sódicos, los valores de CSR son negativos a lo largo del suelo productivo, por lo tanto, son categorizados como suelos aptos para la producción agrícola.

Cuadro 8. Recomendación de uso de suelo y agua para la agricultura (Eaton, 1950).

Recomendación	CSR meq/L
Recomendable	<1.25
Poco recomendable	1.25 – 2.50
No recomendable	>2.50

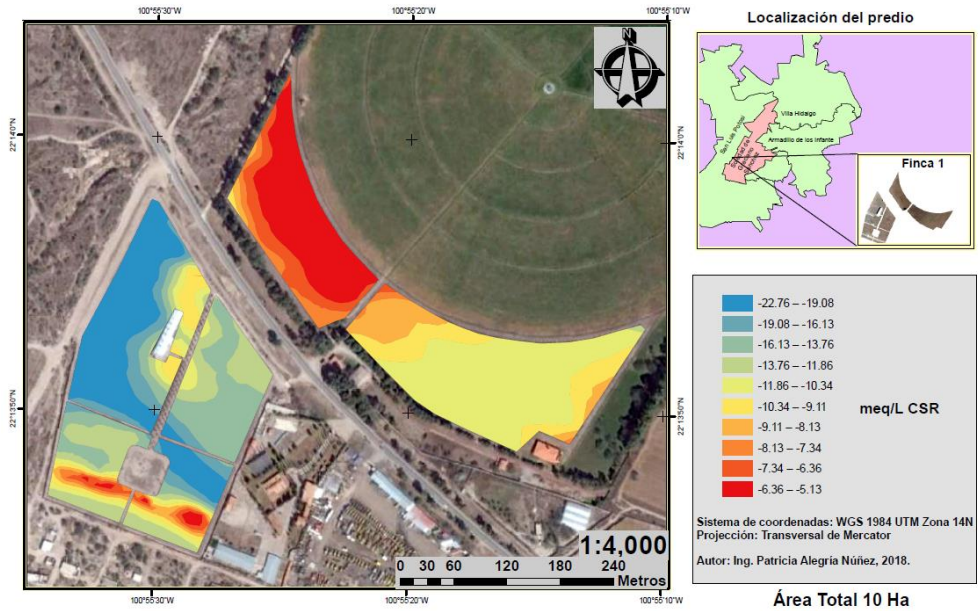


Figura 52. Variabilidad de CSR del suelo en la Finca 1.

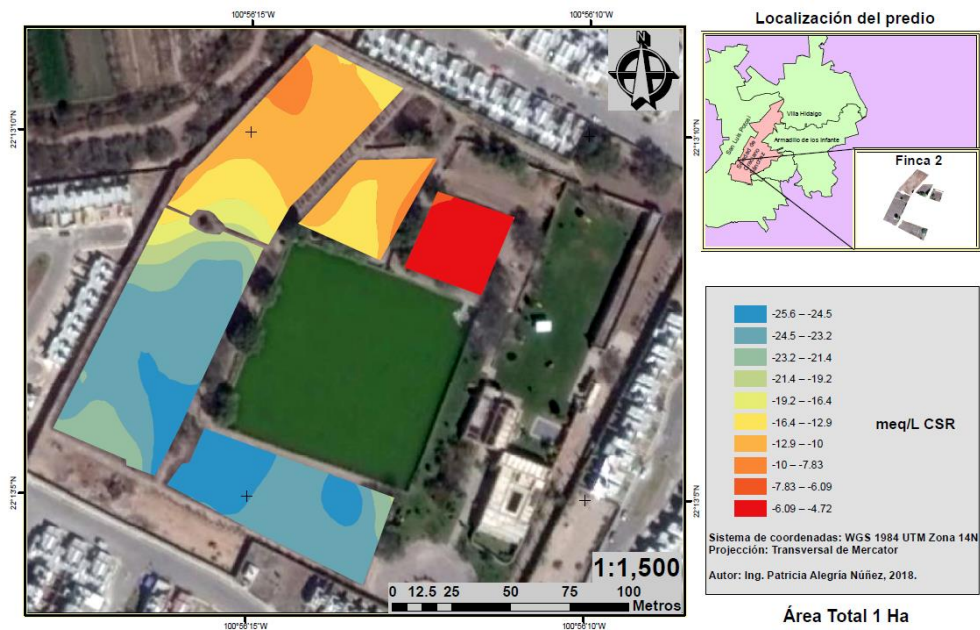


Figura 53. Variabilidad de CSR del suelo en la Finca 2.

Cloruros (Cl)

Los iones tóxicos más comúnmente encontrados en suelos y agua de riego son el ion cloro y el ion sodio. El ion cloruro permanece libre en el extracto del suelo, es absorbido por la planta y se mueve hasta las hojas en donde se acumula y si la concentración de cloruros excede los niveles de tolerancia se presentan síntomas de toxicidad como quemazón y secamiento de los tejidos foliares comenzando por el ápice y se extienden por toda la hoja a razón del grado de toxicidad (García, 2012).

Un suelo salino presenta una limitación en el desarrollo de una planta, debido al efecto osmótico que causan las sales presentes en él, mismas que hacen que sea más difícil la absorción del agua del suelo por parte de las raíces de las plantas (Fabio y Marano, 2014). La condición de la salinidad de un suelo se debe a dos factores, en la primera condición se hace mención a las condiciones de salinidad propias de un suelo, procedente de la meteorización de los minerales y rocas que constituyen la corteza terrestre, y la segunda se debe a la presencia de riegos utilizando un agua que contenga altas concentraciones de sales, aunado el manejo de los sistemas de riego y la eficiencia del drenaje (MAG, 2004), además de considerar el tipo de suelo y la fertilización. Cabe mencionar que en zonas áridas la concentración de sales es más común, ya que no hay presencia de suficientes lluvias que induzcan un lavado de las sales presentes en el suelo (Palacios *et al.*, 2010; Espíndola, 2008).

Para la evaluación de cloruros en suelo existe poca información que permite caracterizar su calidad, por lo tanto, al analizar el extracto de saturación del suelo se decidió evaluar los resultados respecto a la información de la concentración de cloruros en agua de riego.

Maas en 1984 determinó la tolerancia de algunos cultivos al sodio y al cloruro cuando se riega por aspersión, la tolerancia que presentó la vid a la concentración de éstos iones varió respecto a las variedades con un rango de 4.92 – 10 meq/L, mientras que en el extracto saturado del suelo se presenta una tolerancia hasta 25 meq/L.

La Finca 1 presenta una concentración de cloruros que va desde los 2.95 meq/L hasta 13.55 meq/L en toda el área productiva, catalogándose como un extracto de suelo con niveles de concentración por debajo del límite de riesgo de toxicidad, según los parámetros de Maas, 1984.

La Finca 2 presentó en el 100% de la zona productiva concentraciones de cloruros por debajo de los 25 meq/L, sin embargo, el 20% del área de interés se encuentra en los límites de tolerancia para el cultivo de vid, por lo que se presenta un riesgo a toxicidad en el cultivo si se sobrepasan los niveles de cloruros de 25 mg/L.

Cuadro 9. Efecto de la concentración de Cl⁻ en agua de riego (Sela, 2017).

Efecto sobre los cultivos	Cloruro meq/L
Generalmente seguro para todas las plantas	<1.97
Las plantas sensibles muestran lesiones	2.0 – 3.94
Plantas moderadamente tolerantes muestran lesiones	3.97 – 9.85
Puede causar problemas graves	>9.85

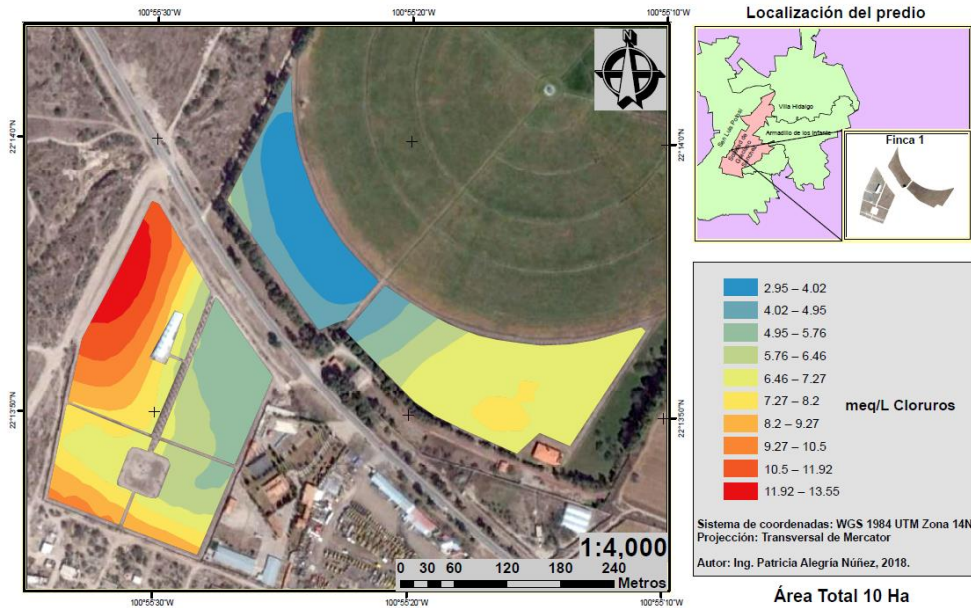


Figura 54. Variabilidad de Cl⁻ del suelo en la Finca 1.

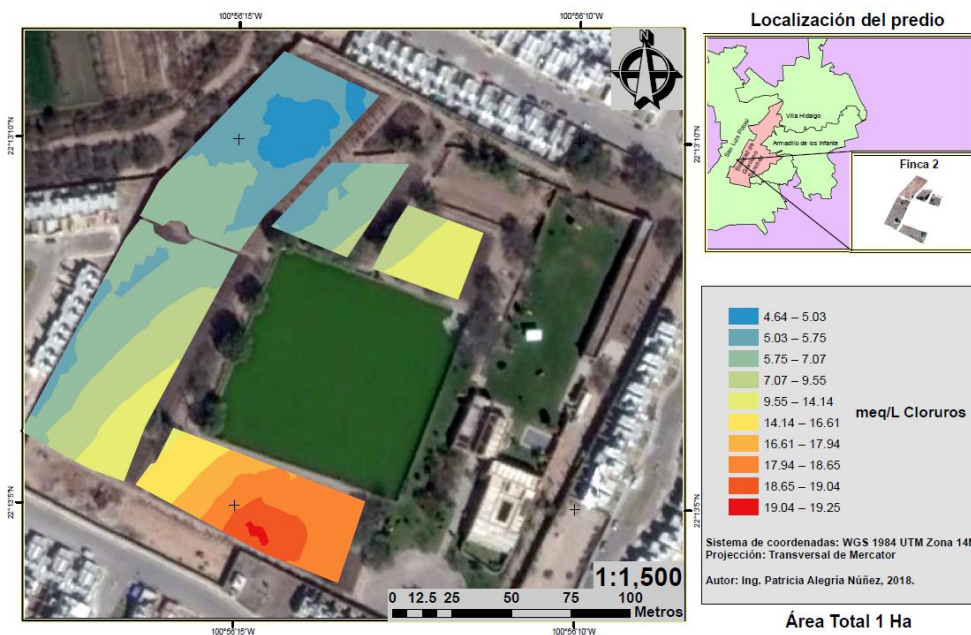


Figura 55. Variabilidad de Cl⁻ del suelo en la Finca 2.

El agua de riego utilizada en la zona, presenta concentraciones elevadas de cloruro, alcanzando 3.18 mg/L, clasificando como un agua que no presenta ningún grado de restricción sobre su uso, sin embargo, el frecuente uso de un agua de riego con concentraciones altas de cloruros y la presencia de éste ion en los límites de sobrepasar el grado de tolerancia para el cultivo de vid, puede dar pie a la generación de problemas de toxicidad en el cultivo, además, la presencia de iones como el sodio, magnesio y calcio, forman sales al reaccionar con el cloruro, las que son principalmente las causantes de la salinidad de un suelo (Ayers y Westcot, 1994).

2.1.5 Correlación de resultados de análisis fisicoquímicos

Finca 1

Cuadro 10. Coeficientes de correlación entre las variables analizadas en la Finca 1 en el software InfoStat.

	CE	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	RAS	PSI
Na ⁺	0.15								
Ca ²⁺	0.82	-0.05							
Mg ²⁺	0.65	-0.06	0.78						
SO ₄ ²⁻	0.47	-0.05	0.7	0.58					
HCO ₃ ⁻	0.23	0.14	0.37	0.22	0.19				
Cl ⁻	0.51	0.5	0.55	0.3	0.63	0.48			
RAS	-0.15	0.86	-0.47	-0.39	-0.31	-0.07	0.24		
PSI	-0.14	0.86	-0.47	-0.39	-0.31	-0.08	0.24	1	
CSR	-0.72	0.1	-0.96	-0.73	-0.75	-0.31	-0.58	0.5	0.5

Correlación CE – Ca²⁺

El calcio es un microelemento indispensable en el funcionamiento de la planta y en la formación de membranas celulares además de dar rigidez a las mismas, así mismo es un regulador de absorción radicular del potasio y sodio, dado que este constituye el elemento fundamental de la construcción de las paredes celulares (Villarías *et al.*, 2011).

Existe una correlación positiva entre la conductividad eléctrica y el calcio cuantificado en el extracto de la solución del suelo, con un valor de 0.82 categorizada como una correlación positiva fuerte. La insuficiencia del calcio se presenta mayoritariamente en suelos ácidos y produce una disminución del tamaño de los pámpanos y la desecación de los racimos (Villarías *et al.*, 2011), lo anterior respalda la correlación CE – Ca²⁺, catalogando a los suelos de la Finca 1 como moderadamente ácidos con deficiencias de calcio (117 mg/L – 543 mg/L) al presentar concentraciones menores a 1000 mg/L (Agrolab, 2005).

Cuadro 11. Rango de concentración de calcio en suelo.

Rango	Ca ²⁺ mg/L
Bajo	<1000
Medio	1000 – 2000
Alto	>2000

Correlación CE – CSR

La correlación entre la conductividad eléctrica y el carbonato de sodio residual es una correlación negativa moderada (-0.72), de manera que la conductividad eléctrica se incrementa en el extracto de saturación del suelo cuando el CRS se vuelve más negativo, concluyendo que el suelo presenta un menor riesgo de sodicidad.

Correlación Na⁺ - RAS

El sodio es la principal variable de la relación de adsorción de sodio. La correlación del sodio con RAS es catalogada como una correlación positiva fuerte (0.86), lo que determina que a medida que el contenido de sodio de una muestra incrementa, la RAS incrementará de manera proporcional.

Correlación Na⁺ - PSI

El análisis de la correlación del sodio y el porcentaje de sodio intercambiable muestran un valor de 0.86, catalogado como una correlación fuertemente positiva, y esto se presenta ya que el principal factor en la ecuación del PSI es la RAS, la cual involucra directamente el sodio, dado que a medida que la concentración de sodio incrementa en el extracto de suelo, el PSI aumenta.

Correlación Ca²⁺ – Mg²⁺

El Ca²⁺ y Mg²⁺ son iones intercambiables y presentan una atracción por los sitios negativos de las arcillas y materia orgánica, siendo difícil de lixiviarse, sin embargo, cierta concentración queda disponibles para las plantas (Sadeghian, 2012). La correlación de los dos cationes en estudio se determinó con un coeficiente de 0.78 y se cataloga como una correlación positiva moderada, lo que se refiere que con forme incrementa el contenido de calcio en el suelo, el contenido de magnesio también incrementa.

El calcio y el magnesio son iones que presentan un antagonismo, por lo que compiten entre sí para entrar a la planta (Sadeghian, 2012), sin embargo, este antagonismo no se determina con la concentración de ambos cationes en el suelo, de manera que es necesario comprobarlo con un análisis foliares del cultivo.

Correlación Ca²⁺ – SO₄²⁻

Ésta correlación se determina como positiva moderada con un valor de 0.7, dado que con forme la concentración de calcio en el suelo incrementa, la concentración de sulfatos se incrementa también. En esta relación entre se producen un precipitado con reducida solubilidad en agua CaSO₄ (Morín, 1980).

Correlación Ca²⁺ – CSR

La relación entre el calcio y el carbonato de sodio residual presentan una correlación de -0.96, catalogada como negativa perfecta, es decir existe una relación indirecta entre el incremento del calcio y el decremento del carbonato de sodio residual, lo que permite hacer una estimación del CSR a partir de la concentración del calcio.

Correlación SO₄²⁻ – CSR

La correlación negativa del sulfato con el carbonato de sodio residual se determina como moderada (-0.75), en zonas con alto contenido de SO₄²⁻, el CSR se presenta de manera negativa, es decir no hay riesgo de desarrollar un suelo sódico.

Correlación Mg^{2+} – CSR

Ésta correlación presenta un coeficiente de -0.73 y se cataloga como positiva moderada. El magnesio funge como una de las variables en la ecuación de la determinación del carbonato de sodio residual, el coeficiente negativo predice que en zonas con alta concentración de magnesio el CSR es menos negativo para el caso de ambas fincas en estudio, si se alcanza una concentración mayor a 1.25 Meq/L se corre el riesgo de que el suelo no sea apto para la producción.

Correlación RAS – PSI

El coeficiente de correlación de la relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable es 1 y se cataloga como una correlación perfecta positiva, lo que determina que existe una correlación directa entre el incremento del RAS con respecto al incremento del PSI, lo que permite realizar estimaciones de cualquiera de las variables a partir de la otra.

Finca 2

Cuadro 12. Coeficientes de correlación entre las variables analizada Finca 2 en el software InfoStat.

	CE	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ⁺²	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	RAS	PSI
Na ⁺	0.53								
Ca ²⁺	0.89	0.55							
Mg ⁺²	-0.2	0.3	-0.26						
SO ₄ ²⁻	0.71	0.64	0.89	0.08					
HCO ₃ ⁻	-0.04	0.54	0.03	0.34	0.28				
Cl ⁻	-0.08	-0.13	0.06	-0.34	-0.11	0.18			
RAS	-0.38	0.28	-0.39	0.45	-0.16	0.89	0.14		
PSI	-0.43	0.23	-0.37	0.42	-0.15	0.69	-0.1	0.81	
CSR	-0.79	-0.33	-0.93	0.15	-0.88	-0.04	-0.08	0.35	0.34

Correlación SO₄²⁻ – CSR

La correlación negativa del sulfato con el carbonato de sodio residual se determina como fuerte (-0.88), en zonas con alto contenido de SO₄²⁻ el CSR se presenta de manera negativa, es decir no hay riesgo de desarrollar un suelo sódico en ninguna de las dos zonas de estudio.

Correlación CE – CSR

La correlación entre la conductividad eléctrica y el carbonato de sodio residual es una correlación negativa moderada (-0.79), a manera que la conductividad eléctrica se incrementa en el extracto de saturación del suelo, el CRS se vuelve más negativo y el suelo presenta un menor riesgo de sodicidad.

Correlación CE – Ca²⁺

Existe una correlación positiva entre la conductividad eléctrica y el calcio cuantificado en el extracto de la solución del suelo, con un valor de 0.89 categorizada como una correlación positiva fuerte, los suelos de la Finca 2 se determinaron como moderadamente ácidos con deficiencias de calcio (130.47 mg/L – 542.38 mg/L) según Agrolab 2005. El alto grado de correlación permite realizar estimaciones de cualquiera de las variables a partir de la otra.

Correlación Ca²⁺ – SO₄²⁻

Ésta correlación se determina como positiva fuerte con un valor de coeficiente de 0.89, lo que determina que con forme la concentración de calcio en el suelo incrementa, la concentración de sulfatos se aumenta también, lo que permite estimar la concentración de cada uno de los iones en estudio con respecto al otro.

Correlación Ca²⁺ – CSR

La relación entre el calcio y el carbonato de sodio residual presentan una correlación de -0.93, catalogada como negativa perfecta, es decir existe una relación indirecta entre el incremento del calcio y el decremento del carbonato de sodio residual, lo que permite hacer una estimación del CSR a partir de la concentración del calcio.

Correlación HCO₃⁻ – RAS

El coeficiente de correlación de bicarbonatos y relación de adsorción de sodio es de 0.89 y se cataloga como una correlación fuerte positiva, permitiendo realizar estimaciones de cualquiera de las variables a partir de la otra.

Correlación RAS – PSI

El coeficiente de correlación de la relación de adsorción de sodio y porcentaje de sodio intercambiable es 0.81 y se cataloga como una correlación positiva fuerte, lo que determina que existe una correlación directa entre el incremento del RAS con respecto al del PSI, permitiendo realizar estimaciones de cualquiera de las variables a partir de la otra.

2.1.6 Conclusiones del capítulo 2. Apartado suelo

- ❖ El análisis fisicoquímico de un suelo permite tener un amplio panorama de su estado nutricional y estructural, a partir del cual se toman medidas de manejo que contribuyen a la reestructuración y saneamiento del mismo, con el objetivo de dar al cultivo un material fértil y capaz de proveer lo necesario para su desarrollo.
- ❖ La riqueza de un suelo se mide en relación a la cantidad de nutrientes presentes en él y la disponibilidad de los mismos para ser absorbidos por las raíces de la planta, sin embargo, el cultivo de la vid presenta una demanda de nutrición de rango bajo a medio, ya que se necesita encontrar un balance entre el rendimiento y la calidad del fruto, pues el objetivo principal es la producción de vino.
- ❖ Se determinaron 5 texturas de suelo en las zonas de estudio: Franco, Franco arcilloso, Franco arenoso, Franco limoso y Franco arcillo arenoso, y el 55% del área productiva de la Finca 1 y el 70% del área de la Finca 2 presentan una textura de suelo franco, permitiendo el apropiado desarrollo radicular del cultivo.
- ❖ El pH del suelo oscila entre los 5.0 y 6.6, lo que favorece el desarrollo apropiado del cultivo, alcanzando un equilibrio en la disolución de los minerales provocando su correcta absorción y asimilación de nutrientes por parte de la planta, además, favorece la producción de vid con características organolépticas favorables para la producción de vino de calidad.
- ❖ Los nutrientes que presentan deficiencia en suelo en un 70% de la zona de estudio es el potasio y el magnesio, sin embargo, las zonas con suficiencia de éstos iones también presentan deficiencias las cuales son visibles en el dosel del cultivo.
- ❖ EL cloruro en suelo es el ion más tóxico y común, permanece libre en la solución y al estar en contacto con cationes en el suelo reacciona y da pie a la formación de sales que contribuyen a la salinidad del suelo y en concentraciones elevadas se desarrolla toxicidad en la planta, además, se altera el efecto osmótico y con esto se reduce la absorción de agua por la planta. Respecto a la concentración de cloruros, la Finca 1 presentó concentraciones de cloruros por debajo del límite de toxicidad para el cultivo, mientras que en la Finca 2 se determinó que el 20% de la zona productiva se encuentra en los límites de tolerancia del cultivo.
- ❖ Se recomienda realizar un análisis químico foliar de la plantación, categorizando por variedades y por los resultados de nutrición de suelo, con el objetivo de determinar si hay presencia de sinergismo o antagonismo ente los iones analizados.

2.2 Calidad de agua de riego

La precipitación media anual en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez es de 326.2 mm, misma que no logra cubrir la demanda mínima del cultivo de vid, de 600 mm, por lo que se presenta la necesidad de realizar riegos a lo largo del ciclo productivo para abastecer la necesidad hídrica. El riego es la herramienta de manejo que contribuye a la mejora del cultivo, solventando problemas de uniformidad, calidad de producto final y mejora en los rendimientos, por otro lado, aportaciones excesivas del recurso hídrico en la zona productiva se manifiesta con un crecimiento y productividad abundante, afectando negativamente los parámetros de calidad del fruto para vinificación (acidez, azúcares y pigmento) (Van Leeuwen y Seguin, 1994), además, el uso inapropiado del riego es frecuentemente un de las causas principales de la degradación química y física del suelo. Tradicionalmente se ha tratado la calidad del agua para riego respecto a sus características químicas, mismas que se definen por su salinidad, sodicidad y toxicidad, determinadas por la concentración y composición de los constituyentes disueltos en ella (Ayers y Westcot, 1994). La clasificación de la calidad del agua es una problemática compleja, ya que para en este fin intervienen factores como el cultivo, suelo, clima, disponibilidad, tipo y manejo del riego, y el análisis y la interpretación de las características químicas del recurso hídrico solo ofrecen una guía sobre la reacción que podría esperarse al utilizar el líquido (Vaquero, 2014).

Por lo anteriormente mencionado es que la calidad del agua para riego es una variable importante a considerar en la presente investigación, de forma que los cuatro efectos derivados de la concentración de sales en el agua de riego son, la salinidad, sodicidad, infiltración y toxicidad.

La salinidad se refiere al riesgo que presenta un suelo de acumular sales, y cuanto más grande es éste contenido el impacto osmótico en el suelo incrementa y la planta ejerce mayor fuerza para absorben el agua del suelo, por lo tanto, a medida que las sales se incrementan la capacidad de absorción de la planta disminuye. Así mismo, el mecanismo de infiltración del agua en el suelo se ve afectado cuando el contenido de sodio se incrementa y su relación con el calcio disminuye, además, las partículas del suelo se dispersan a medida que la concentración de sales se incrementan, lo que ocasiona una modificación física en el suelo, disminuyendo la velocidad de infiltración (Vaquero, 2014; Palacios *et al.*, 2010).

El efecto de sodicidad en un suelo está relacionado con la cantidad de sodio intercambiable presente en él, y éste mismo analiza el riesgo del incremento del PSI quien es el encargado de modificar la estructura y propiedades físicas del suelo, afectando directamente el desarrollo del cultivo (May, *et al.*, 2016).

La zona de estudio cuenta con dos pozos que abastecen en su totalidad la demanda de riego de la vid y en cada uno de ellos se tomaron muestras únicas para el análisis químico correspondiente. Las muestras se analizar para la determinación de las variables: pH, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, nitratos, sulfatos, sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonatos y cloruros.

2.2.1 Metodología para la recolección de muestras

Para la recolección de las muestras de agua para riego se utilizaron bolsas de polietileno estériles con cierre. Las muestras fueron tomadas por la mañana en cada una de las tomas de agua para cada finca en estudio.

En la Finca 1 se realiza el riego con agua de pozo, ahí se tomó una muestra simple de la salida principal del recurso hídrico, se lavó un contenedor para posteriormente canalizar el agua de la toma, una vez llenado el contenedor, se sumergió la bolsa de polietileno, se tomó la muestra y se cerró la bolsa en el interior del contenedor sin que la muestra tuviera contacto con el ambiente, se guardó la muestra en una hielera y se trasladó al laboratorio de Análisis de Administración de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí para su posterior análisis.

El viñedo de la Finca 2 es regado con agua de pozo, sin embargo, en un primer momento el agua es extraída de pozo y es almacenada en un estanque de uno recreativo, para posteriormente ser utilizada. La muestra para el análisis se tomó en la salida principal del agua hacia el riego, la metodología es la descrita en el párrafo anterior.

Es necesario mencionar que la muestra no debe de estar expuesta a la luz del sol y debe de ser analizada en un tiempo no mayor a 12 horas después de su recolección (NOM-021-RECNAT-2000).

2.2.2 Metodologías de Análisis químico en laboratorio

Las metodologías utilizadas para el análisis de agua son las que se describen en el apartado 2.1.3 que corresponde al título “Metodologías de Análisis edafológicos básicos en laboratorio”,

2.2.3 Caracterización de la calidad del agua para riego

Determinación de pH.

Con respecto a la clasificación de pH del suelo y agua bajo la Norma NOM-021-RECNAT-2000, se determina que agua utilizada para riego en las dos fincas en estudio son catalogadas como aguas neutras.

Determinación de Sólidos Disueltos Totales (SDT).

La calidad del agua para uso de riego por goteo de la Finca 1 se determinó sin ningún grado de restricción de uso respecto al analizar los SDT, mientras que el agua para riego de la Finca 2 está catalogada con un grado de restricción ligero para el uso en riego por goteo, ya que, a mayor concentración de sólidos en el agua utilizada, se incrementan los problemas operacionales en el sistema de riego, como consecuencia una desuniformidad en la aplicación e incremento de los costos de mantenimiento.

Cuadro 13. Rango de concentración de SDT en agua de riego.

Grado de restricción	SDT mg/L
Ninguno	<500 mg/L
Ligero - Moderado	500 – 2000 mg/L
Severo	>2000 mg/L

Determinación de conductividad eléctrica (CE).

Las dos fincas de estudio no muestran ningún riesgo de salinidad si se analiza la conductividad eléctrica del agua de riego (NOM-021-RECNAT-2000).

Cuadro 14. Resultados de pH, CE, SDT en agua de riego de las fincas en estudio.

Muestra	pH	CE dS/cm⁻¹	SDT mg/L
Finca 1	6.6	0.00329	162
Finca 2	6.7	0.00809	489

Nitratos (NO₃⁻N)

La Finca 1 presentó una concentración de nitratos en agua de 11.34 mg/L, lo que la catalogó con un grado de restricción ligero a moderado en cultivos susceptibles; la Finca 2 se determinó con un riesgo de uso grave al presentar una concentración de 30.94 mg/L. La clasificación de restricción de uso se presenta en la Cuadro 16 (Ayers y Westcot, 1994).

Sulfatos (SO₄⁻²)

La concentración de sulfato en las muestras analizadas fue de 0.28 meq/L y 0.79 meq/L para la Finca 1 y Finca 2, respectivamente, ambas concentraciones de sulfatos se catalogan dentro del rango habitual encontrado en aguas de riego (Cuadro 16).

Calcio (Ca⁺²)

El rango habitual de calcio en el agua utilizada para riego en producción agrícola es de 0 – 20 meq/L (Cuadro 16), concentración que se cumple en el agua utilizada para riego de las dos fincas en estudio. La Finca 1 presentó 0.98 meq/L y la Finca 2 mostró 4.24 meq/L.

Potasio (K⁺)

Las concentraciones de potasio para cada una de las muestras de agua analizadas están por encima del rango habitual de un agua para riego, 8.58 y 26.91 mg/L para la Finca 1 y Finca 2, respectivamente (Cuadro 16).

Bicarbonato (HCO_3^{-1})

La concentración de bicarbonato en las muestras analizadas para cada una de las fincas en estudio se encuentra dentro del rango habitual en un agua de riego, 0 – 10 meq/L (Cuadro 16). La Finca 1 presentó una concentración de 3.02 y 4.19 meq/L fue la concentración del agua analizada de la Finca 2.

Magnesio (Mg^{2+})

El ion magnesio presente en el agua de riego de la Finca 1 presentó una concentración de 1.31 meq/L, mientras que en la Finca 2 la concentración fue de 1.14 meq/L, ambas fuentes de agua para riego se ubican en el rango habitual de concentración de magnesio en aguas utilizadas para el riego (0 – 5 meq/L), según lo descrito en la Cuadro 16.

Cloruros (Cl^-)

Analizando los resultados correspondientes a la concentración de cloruros en las fuentes de agua para riego de la zona de estudio, se determinó que no existe ningún grado de restricción de uso del recurso hídrico para el riego con forme lo mencionan las directrices para la interpretación de la calidad de agua para el riego (Cuadro 16), ya que las concentraciones de cloruro son de 0.33 y 3.18 meq/L para la Finca 1 y Finca 2, respectivamente, sin embargo, el agua de riego utilizada en la Finca 2 se encuentra en los límites permisibles de uso, por lo que se recomienda un monitoreo de la calidad del agua, con el objetivo de evitar casos de incremento en las concentraciones de cloruros en suelo.

Sodio (Na^+)

Las Fincas 1 y 2 presentan concentraciones de sodio de 0.89 meq/L y 1.57 meq/L respectivamente; analizando ésta variable en las directrices de calidad del agua para el riego superficial mencionadas en la Cuadro 16, se determina que ambas fuentes de agua no tienen ningún grado de restricción de uso para el riego.

Cuadro 15. Resultados de iones analizados en agua de riego de las fincas en estudio.

Muestra	NO_3^- meq/L	NO_2^- meq/L	SO_4^{-2} meq/L	HCO_3^{-1} meq/L	Ca^{+2} meq/L	Mg^{2+} meq/L	Cl^- meq/L	Na^+ meq/L	K^+ meq/L	F^- meq/L
Finca 1	0.81	0.06	0.28	3.02	0.98	1.31	0.33	0.89	0.22	0.04
Finca 2	2.21	0.16	0.79	4.19	4.24	1.14	3.18	1.57	0.69	0.04

Cuadro 16. Directrices para las interpretaciones de la calidad del agua para el riego (Ayers y Westcot, 1994).

Posible problema de riego	Unidades	Grado de restricción de uso		
		Ninguna	Ligero moderado	Grave
Salinidad (afecta la disponibilidad de agua del cultivo)				
EC _w (o) TDS	dS / m ⁻¹ mg / l	<0.7 <450	0.7 - 3.0 450 - 2000	> 3.0 > 2000
Infiltración (afecta la tasa de infiltración de agua en el suelo. Evaluar usando CE y RAS juntos)				
RAS = 0 - 3	y CE _w =	> 0.7	0.7 - 0.2	<0.2
= 3 - 6	=	> 1.2	1.2 - 0.3	<0.3
= 6 - 12	=	> 1.9	1.9 - 0.5	<0.5
= 12 - 20	=	> 2.9	2.9 - 1.3	<1.3
= 20 - 40	=	> 5.0	5.0 - 2.9	<2.9
Toxicidad iónica específica (afecta a cultivos sensibles)				
Sodio (Na)				
riego superficial	RAS	<3	3 - 9	> 9
riego por aspersión	me / l	<3	> 3	
Cloruro (Cl)				
riego superficial	me / l	<4	4 - 10	> 10
riego por aspersión	me / l	<3	> 3	
Boro (B) ⁵	mg / l	<0.7	0.7 - 3.0	> 3.0
Efectos misceláneos (afecta cultivos susceptibles)				
Nitrógeno (NO ₃ - N)	mg / l	<5	5 - 30	> 30
Bicarbonato (HCO ₃) (solo por aspersión)	me / l	<1.5	1.5 - 8.5	> 8.5
pH		Rango normal 6.5 - 8.4		

Clasificación del agua de riego con base al peligro de infiltración

La infiltración en el suelo es un proceso complejo que varía respecto a las propiedades físicas como la estructura, textura, compactación y materia orgánica del mismo, así como de las propiedades químicas del suelo y del agua con que se riega. Una de las fuentes por las que se puede afectar es a través del agua de riego y su calidad.

Uno de los problemas más comunes que se presentan es la disminución de la tasa de infiltración, y es cuando el agua permanece en la superficie del suelo por un periodo de tiempo prolongado o se infiltra demasiado lento, trayendo consigo problemas sanitarios o de falta de aireación necesaria en las raíces de los cultivos, provocando su muerte.

Así, la tasa de infiltración se relaciona directamente con: la salinidad (contenido total de sales) y su relación con el contenido de sodio. Un agua con una baja salinidad y una relación alta de sodio trae consigo una reducción en la infiltración (Ayers y Westcot, 1994), es decir, que a medida que la salinidad (CE) se incrementa, no hay riesgo de que se presenten problemas de infiltración, mientras que, cuando la RAS (por la presencia de sodio) es mayor, la infiltración se reduce relativamente (Cuellar *et al.*, 2015).

Cuadro 17. Variables analizadas para la clasificación de calidad del agua de riego.

Muestra	CSR meq/L	RAS meq/L
Finca 1	0.73	0.83
Finca 2	-1.19	0.96

Cuadro 18. Rango habitual de concentración de iones en un agua de riego (Ayers y Westcot, 1994).

Parámetro de agua	Símbolo	Unidad	Rango habitual en agua de riego
SALINIDAD			
<u>Contenido en sal</u>			
Conductividad eléctrica	EC _w	dS / m ⁻¹	0 - 3
(o)			
Sólidos disueltos totales	TDS	mg / l	0 - 2000
<u>Cationes y aniones</u>			
Calcio	Ca ⁺⁺	meq / l	0 - 20
Magnesio	Mg ⁺⁺	meq / l	0 - 5
Sodio	Na ⁺	meq / l	0 - 40
Carbonato	CO ₃ ⁻	meq / l	0 - .1
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	meq / l	0 - 10
Cloruro	Cl ⁻	meq / l	0 - 30
Sulfato	SO ₄ ⁻	meq / l	0 - 20
NUTRIENTES			
Nitrato-Nitrógeno	NO ₃ -N	mg / l	0 - 10
Amonio-Nitrógeno	NH ₄ -N	mg / l	0 - 5
Phosphate-Phosphorus	PO ₄ -P	mg / l	0 - 2
Potasio	K ⁺	mg / l	0 - 2

El agua que presenta una CE baja y la presencia de iones hidratados, al contacto con los iones del suelo (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, calcio, etc.), reaccionan, forman sales y se precipitan (Oster y Schroer, 1979), mientras que el sodio permanece en la capa superficial del suelo e influye en la estructura del mismo, sellándolo y reduciendo notablemente la infiltración (May *et al.*, 2016).

Para clasificar el agua de riego de las fincas en estudio con base al peligro de infiltración se trabajó con el apartado de infiltración del Cuadro 16, propuesto por Ayers y Westcot, (1994), mismo que se basa en la relación que existe entre los contenidos de calcio y magnesio (iones que incrementan la CE), con respecto a la RAS. Es decir, aunque se tengan bajas concentraciones de sodio en el agua, pero también bajas concentraciones de los iones principalmente de calcio y magnesio, el riesgo de sodificación será alto y por consecuencia de un problema de baja infiltración en el suelo. La relación entre los iones de calcio, magnesio y sodio, son importantes para decidir entre, sí puede afectar o no la infiltración en un suelo.

El agua de riego de la Finca 1 presentó un valor de RAS de 0.83 y una CE de 0.00329 dS/m⁻¹, la Finca 2 mostró una CE 0.0809 dS/m⁻¹ y una RAS de 0.96, por lo tanto, cada una de las fuentes de agua es catalogada con un grado de restricción de uso grave al analizar el parámetro de infiltración (Ayers y Westcot, 1994), ya que a medida que la concentración de iones como el calcio, magnesio disminuyen, las partículas del suelo se disgregan, ante la presencia de iones de sodio (aunque sea en bajas concentraciones), ocasionando una expansión y dispersión de las arcillas (González, 2001), y con esto, una reducción en la velocidad de infiltración, además de que a largo plazo pueden presentarse problemas de sodicidad en suelo, poniendo en riesgo la estabilidad estructural de los suelos y el estado hídrico de la vegetación.

Por lo que para contrarrestar el efecto de reducción de infiltración se recomienda que se realicen riegos abundantes con el objetivo de lavar las sales presentes en el suelo y se dé un manejo adecuado al suelo y a los sistemas de riego.

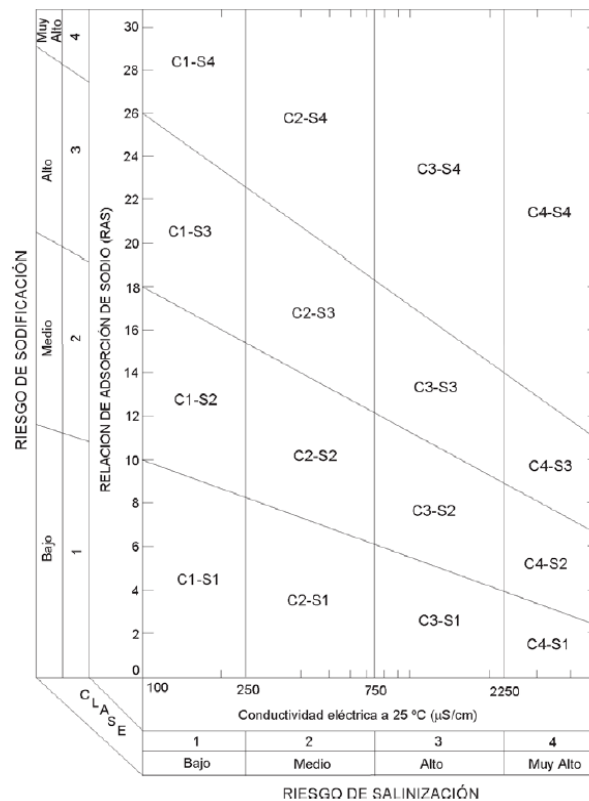


Figura 56. Diagrama de clasificación de riesgo de sodicidad y salinidad (Richards, 1954).

Clasificación del agua de riego con base a su sodicidad y salinidad

Alto contenido de sodio en agua, induce a un deterioro de la estructura del suelo a largo plazo, mientras que, la salinidad determina el riesgo a proveer al suelo de altas concentraciones de sales, las que terminan afectando el rendimiento del cultivo, ya sea por toxicidad o por afectaciones en la absorción de agua del suelo (May *et al.*, 2016; Ayers y Westcot, 1994).

Clasificación del agua de riego con base al carbonato de sodio residual (CSR)

En la mayoría de los casos las zonas áridas y semiáridas son regadas con aguas que contienen altos contenidos de carbonato de sodio residual, acumulando las sales en las capas del suelo e incrementando los riesgos a la sodificación de un suelo, afectando directamente el desarrollo del cultivo (Fabio y Marano, 2014).

Las aguas analizadas en las dos zonas de estudio presentan concentraciones de CSR menores a 1.25 meq/L y se consideran aptas para el riesgo agrícola sin ningún grado de restricción, ya que las concentraciones fueron de 0.73 meq/L y -1.19 meq/L en la Finca 1 y Finca 2, respectivamente.

2.2.2 Humedad en suelo

El suelo funge como un reservorio del agua y desempeña un papel fundamental en beneficio de las plantas; para que la raíz de una planta pueda disponer del agua en un suelo, el agua debe de encontrarse almacenada en el reservorio y estar disponible para cuando la planta lo demande.

El suelo y el gradiente de concentración movilizan el recurso hídrico de zonas que presentan mayor disponibilidad a las zonas que demandan el recurso, además el agua disponible debe de encontrarse con un bajo nivel energético para que las raíces puedan absorberla con un mínimo de esfuerzo.

Cada tipo de suelo muestra condiciones físicas particulares que determinan cuánta agua es capaz de retener y cuanta está disponible para la planta.

Humedad a Saturación, Capacidad de Campo, Aprovechable y a Punto de Marchitez

La humedad a saturación es la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener después de que el agua cesa de escurrir, ésta ocupa los espacios porosos más grandes del suelo (Del Valle, 1992), después de que el agua de saturación termine de escurrirse y a medida que los espacios porosos queden libres, se alcanza la capacidad de campo, siendo ésta la capacidad de retención de humedad o capacidad de retención capilar de los espacios porosos de tamaño medio. Seguidamente se presenta la humedad aprovechable, misma que se refiere al agua retenida por el suelo, la cual es utilizable por la planta y su retención se desarrolla en los capilares o como películas gruesas alrededor de los sólidos del suelo, y a medida que el agua es absorbida por la planta y evaporada, la tasa de humedad del suelo se reduce hasta que la planta no logra absorber más agua del suelo y logra alcanzar un marchitamiento permanente, además es imposible recobrar su turgencia, aun cuando se coloque en una atmósfera saturada (López, 2000).

Condición de Humedad Finca 1

En la Finca 1 se alcanzaron concentraciones que van del 30.05% al 49.75% de humedad a saturación, la zona que cuenta con un porcentaje de humedad a saturación menor es en la que se presentan suelos con contenido alto de arena (franco arenoso) y suelos francos con al menos un 35% de arena en su textura. El suelo franco y franco arenoso presentan un menor grado de capacidad de retención de humedad que las arcillas, pero un grado mayor que las arenas (López, 2000), el suelo franco arcilloso es el que permite mayor grado de retención de humedad a saturación alcanzando casi el 50%.

El suelo franco y franco arenoso logran retener menor porcentaje de humedad que un suelo franco arcilloso, sin embargo, en la variable punto de marchitez permanente el suelo arcilloso alcanza más rápido el grado crítico de marchitez de una planta, es decir, cuando el suelo arcilloso cuenta con un 11% de humedad, la planta ya no logra subsistir, mientras que una planta en un suelo franco o franco arenoso aun cuenta con más humedad y comienza el punto de marchitez permanente cuando el suelo presenta un 7% de humedad.

Condición de Humedad Finca 2

En la Finca 2 el suelo de textura franco arcillosa es quien presentó un mayor grado de humedad a saturación, alcanzando el 51.26%, el suelo franco arcilloso de la Finca 2 presenta un 4% más de arcilla que el suelo franco arcilloso de la Finca 1.

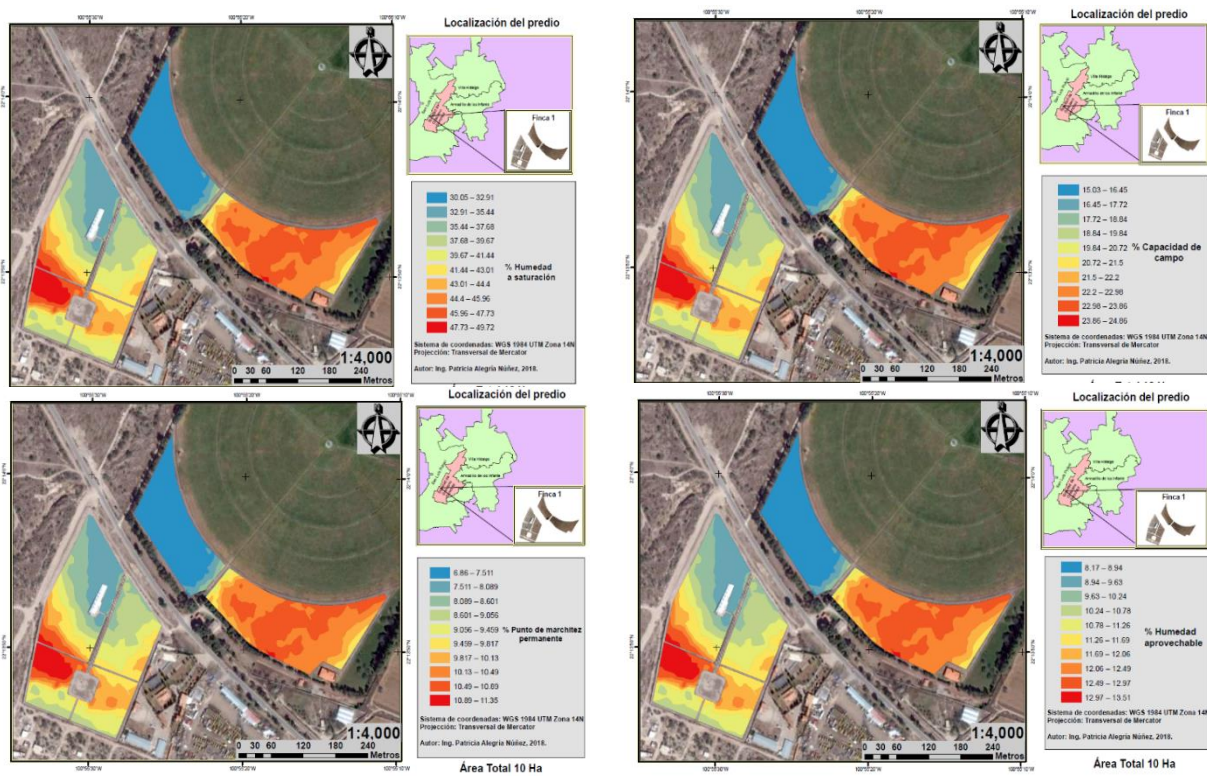


Figura 57. Distribución de la Humedad del suelo en la Finca 1.

Las zonas con una menor retención de humedad a capacidad de campo y humedad aprovechable son los suelos francos, con un contenido de arena que va de un 40% a 50%, el suelo franco con un porcentaje de arena menor al 40% muestra una retención de humedad intermedia.

Una planta en el suelo franco arcilloso de la finca en estudio, alcanza su punto de marchitez permanente cuando el suelo presenta un 11.70% de humedad, mientras que un suelo franco con contenido del 50% de arenas, el punto crítico se alcanza cuando se llega a 8.20% de humedad.

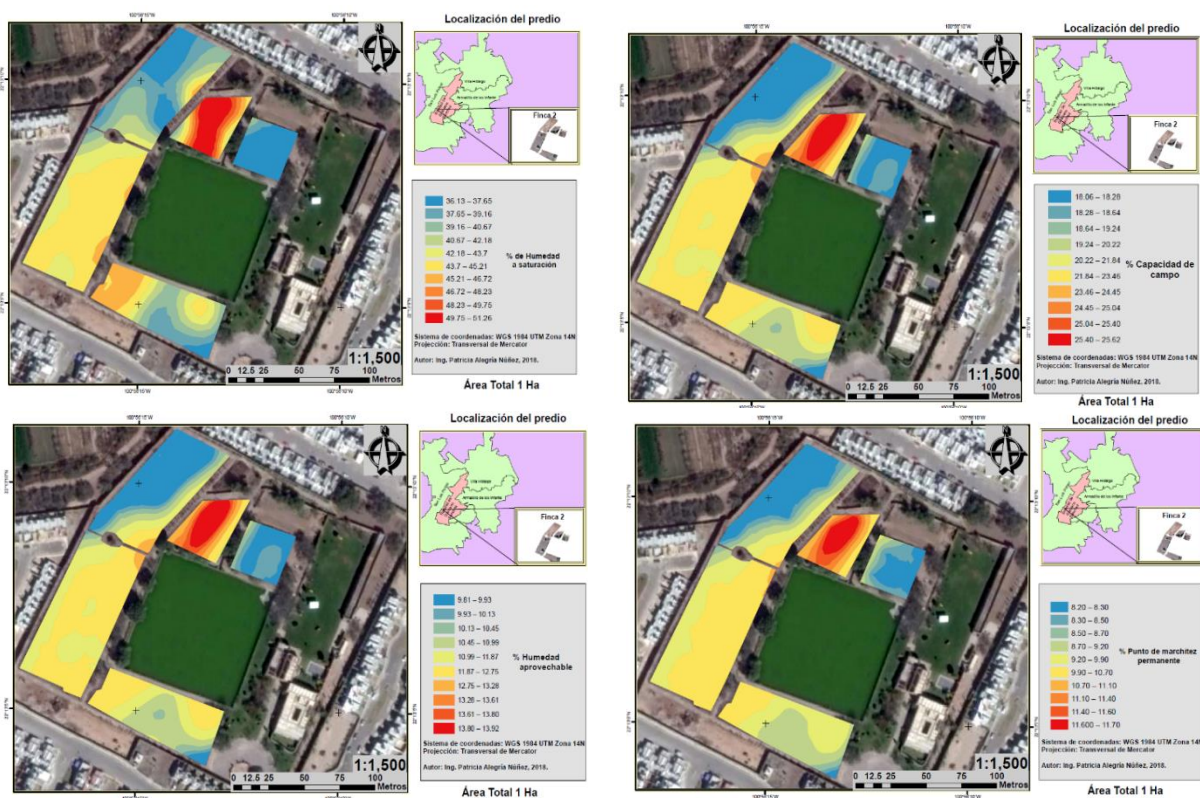


Figura 58. Distribución de la Humedad del suelo en la Finca 2.

2.3 Integración y generalidades del continuo Agua, Suelo, Planta y Atmósfera

Una vez concluida la revisión bibliográfica del Capítulo 1 y los análisis fisicoquímicos correspondientes a las variables de suelo y agua de riego descritos en el Capítulo 2, se realizó una integración de la información obtenida en el continuo Agua, Suelo, Planta y Atmósfera, en donde se concluye lo siguiente:

El cultivo de vid para vino es una planta perenne de fácil adaptación a condiciones climáticas diversas y a una amplia variedad de texturas de suelos, además de no requerir de un plan de nutrición enriquecedor debido a que su objetivo principal está enfocado a la producción de vid de calidad con condiciones organolépticas favorables para la elaboración de vino.

Vitis vinifera es una planta que necesita de un periodo de estrés hídrico durante su desarrollo, específicamente durante la etapa de cuajado del fruto, éste es demandado por la necesidad de incentivar la acumulación de azúcares y metabolitos secundarios que benefician de manera directa la calidad del fruto final. Debido a la necesidad de presentar un estrés hídrico, el cultivo muestra una afinidad media a la condición de salinidad del suelo en donde se desarrolla, con un límite de tolerancia a la CE de 1.50 dS/m, dado que los suelos de las fincas analizadas presentan concentraciones menores a 0.2 dS/m, por lo que no existe ningún riesgo a toxicidad por las concentraciones de sodio presente, además, al analizar el parámetro de salinidad en el agua de riego, se determina que ésta es apta para su uso agrícola, ya que sus características de salinidad media y sodicidad baja están dentro del límite permisible según Richards, 1954.

Con respecto a la tolerancia del cultivo al ion cloruro en suelo, éste muestra un límite de 25 meq/L antes de presentar síntomas de toxicidad, mientras que la mayoría de los cultivos presentan afectaciones cuando la concentración de cloruros en suelo se encuentra entre 4 – 9.8 meq/L, de manera que para los suelos de las fincas en estudio se obtuvieron concentraciones por debajo de 20.0 meq/L, mismas que están dentro del límite de tolerancia, no obstante una vez analizada el agua utilizada para el riego con base a las directrices de toxicidad por cloruros de Ayers y Westcot (1994) se determinó un grado de restricción ligero en el uso del agua (Finca 2), que a largo plazo puede incrementar la concentración del ion en el suelo y dando como resultado síntomas de toxicidad en el cultivo.

Determinando de esta manera que la condición de sanidad del suelo respecto a cloruros y salinidad, es muy buena y que la calidad del agua de riego es alta y puede ser utilizada sin ningún grado de restricción al evaluar los parámetros de salinidad y sodicidad.

2.4 Conclusiones del capítulo 2. Apartado agua

- ❖ El análisis químico en aguas de riego permite conocer su calidad y determinar si es o no apta para el uso agrícola, además ofrece una guía sobre las posibles reacciones y efectos derivados al contacto con el suelo tales como la salinidad, mecanismo de infiltración, sodicidad y toxicidad.
- ❖ La salinidad analizada bajo la variable CE determinó que no hay riesgo de salinización en suelo para ninguna de las fincas en estudio, por lo tanto, no presenta ninguna restricción en su uso.
- ❖ Respecto a la determinación de SDT, el agua de riego de la Finca 1 no presenta ninguna restricción en su uso en sistemas de riego por goteo, mientras que el agua analizada de la Finca 2 presenta una restricción ligera en su uso.
- ❖ Las concentraciones de sulfatos, bicarbonatos, calcio y magnesio de las dos fuentes de agua para riego se encuentran dentro de los rangos habituales de un agua utilizada en el sector agrícola.
- ❖ Los iones de cloro y sodio presentes en las fuentes de abastecimiento del recurso hídrico en la zona de estudio, no presentan ningún grado de restricción de uso para el riego, ya que se encuentran dentro del rango permisible < 4 y < 3 meq/L, respectivamente.
- ❖ En cuanto a la clasificación del agua de riego con base al parámetro de infiltración, ambas fuentes de agua son catalogadas sin ningún grado de restricción para su uso en riego.
- ❖ Al analizar la interacción de la CE y la RAS se determinó que el riesgo que representa el uso del agua en ambas zonas de estudio es bajo para el parámetro de sodicidad, mientras que el riesgo a presentar salinidad en suelos de la Finca 1 es catalogado como bajo y en la Finca 2 se determinó como un riesgo alto.
- ❖ Con respecto a la variable de CSR se determinó que ambas fuentes de suministro de agua se consideran aptas para el riego agrícola sin ningún grado de restricción.
- ❖ Se recomienda hacer evaluaciones de la CE, CSR, PSI y RAS, inmediatamente después de realizar los riegos al cultivo, con el objetivo de identificar el incremento de la concentración de cada una de las variables analizadas con respecto a la concentración de sales presentes en el agua de riego y los caudales aplicados, esto con el objetivo de determinar el grado de reacción de los iones de agua y suelo.

2.5 Abreviaciones del capítulo 2

CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico
CSR	Carbonato de sodio residual
EARTH	Escuela de Agricultura de la Región Trópico Húmedo
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
INIFAP	Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
INIA	Instituto de Investigaciones Agropecuarias
MAG	Ministerio de Agricultura
PSI	Porcentaje de sodio intercambiable
RAS	Relación de adsorción de sodio
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SSA	Suelos Sulfatados Ácidos
Ca ²⁺	Calcio
CE	Conductividad Eléctrica
Cl ⁻	Cloruros
CO ₃ ²⁻	Carbonatos
HCO ₃ ⁻	Bicarbonatos
K ⁺	Potasio
Mg ²⁺	Magnesio
Na ⁺	Sodio
NO ₂ ⁻	Nitritos
NO ₃ ⁻	Nitratos
pH	Potencial de Hidrógeno
SO ₄ ²⁻	Sulfatos

2.6 Bibliografía del capítulo 2

- Agrolab. 2005. Guía de referencia para la interpretación: análisis de suelos Agrolab. Acreditado ISO 17025:2005. México (MX). 15 pp.
- Amezquita, E. 1988. Establecimiento de las zonas oxidadas y reducidas en suelos sumergidos. In: Primer seminario de azufre. S. C. C. S. Colombia (CO). 43 pp.
- Ararat, A. 1996. Evaluación del estado de los nutrientes en los suelos del Departamento de Córdoba. In: Temas Agrarios. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba. Colombia (CO). 45 pp.
- ArcGIS Pro. 2018. Conceptos del conjunto de herramientas Interpolación de raster. Estados Unidos (EU).
- Ayers, R., Westcot, D. 1994. Water quality for agricultura. FAO. Italia (IT). ISBN 92-5-102263-1. 174 pp.
- Bernier, R., Alfaro, M., 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Chile(CL) ISSN 0717-4829. 46 pp.
- Cánovas. J., 1986. Calidad agronómica de las aguas de riego. 3ª ed. ISBN 8434101602. 55 pp.
- Castellanos, J., Uvalle, J., Aguilar, A. Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Colección INCAPA. 2ª edición. México (MX).
- Combatt, E., Jarma, A., Cleves, A., 2008. Efecto del encalamiento de suelos sulfatados ácidos en Córdoba (Colombia) sobre el fruto de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.). Colombia (CO). 173-179 p.
- Combatt, E., García, A., Mercado, F. 2004. Efecto del encalamiento y el lavado sobre algunas propiedades químicas de un suelo sulfatado ácido magnésico del valle del río Sinú. Tesis de magíster en suelos. Universidad de Córdoba. Colombia (CO). 167 pp.
- Cuellar, E., Ortega, M., Ramírez, C., Sánchez, E. 2015. Evaluación de la relación de adsorción de sodio de las aguas de la red hidrográfica del Valle del Mezquital, Hidalgo. Rev, mex. Cien. Agric. Vol. 6. México (MX). 12 pp
- Dent, D. 1992. Reclamation of axial sulfate soils. Advances in soils sciences. Springer. Ver Land. Estados Unidos (US). 81 pp.
- Del Valle, H. 1992. Prácticas de relación agua-suelo-planta-atmósfera. 1ª edición. México (MX). ISBN 968-884-190-0. 167 pp.

- Escuela de Agricultura de la Región Trópico Húmedo (EARTH). 2013. Guía de curso: Propiedades de Suelos del Trópico. Universidad EARTH. Costa Rica (CR). 79 pp.
- Eaton, F., 1950. Significance of carbonates in irrigations waters. *Soil Science* Vol.69. 127 – 128 pp.
- Espíndola, R., Pugliese, F., 2008. Fertilización razonada de la vid. Ministerio de Agricultura y Pesca. Argentina (AR). 39 pp.
- Espinoza, L., Slaton, N., Mozaffari, M., 2006. Como interpretar los resultados de los análisis de suelos. University of Arkansas System. Estados Unidos (EU) FSA.2118SP. 4 pp.
- Fabio, A., Marano, R., 2014. Rehabilitación de suelos con impedimentos físicos de uso hortícola degradados por riego con aguas bicarbonatadas sódicas. [Tesis Maestría. Cultivos Intensivos] Argentina (AG): Universidad Nacional de Litoral. Facultad de Ciencias Agrarias. 100 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2009. Guía para la descripción de suelos. 4ª edición. Roma (IT). 111 pp.
- Fernández, C., Combatt, E., Rivera, H., 2011. Algunas características de la estomofauna de suelos sulfatados ácidos en Córdoba, Colombia. Colombia (CO). ISSN 2007-0934. 10 pp.
- Fitzpatrick, R., Fritsch, E., Self, P. 1993. Australia's unique saline acid sulfate soils associated with dryland salinity'. In Bush, R. (ed.), *Proceedings of the First National Conference on Acid Sulfate Soils*, Australia (AU). 41-56 pp.
- García, A., 2012. Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego. International Union of Soil Science. 10 pp.
- García, R., Mudarra, I., 2008. Buenas Prácticas de Producción Ecológica. Cultivo de la Vid. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Maricno. España (ES). ISBN: 978-84-491-0866-2. 36 pp.
- Garrido, S., 1994. Interpretación de análisis de suelos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España (ES). ISBN: 84-341-0810-0. 40 pp.
- González, A. 2001. Evaluación de la dinámica y los efectos de los bicarbonatos de las aguas de riego sobre las propiedades de los suelos de áreas del valle del Cauca y Tolima. Universidad Nacional de Colombia, Escuela de Postgrados Sede Palmira. Tesis Doctoral. Colombia (CO). 96 pp.
- Hidalgo, J., 2006. La calidad del vino desde el viñedo. España (ES). ISBN: 9788484762799. 360 pp.
- InfoStat. Software Estadístico. 2016. Manual de usuario. Versión 2008.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2000. Los análisis físicos y químicos en la cartografía edafológica del INEGI. Guía Normativo-Methodológica. México (MX).
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 1983. Estudio general de los suelos de los municipios se conforman la parte media y baja de la cuenca del Río Sinú. Colombia (CO). 8 pp
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2012. Muestreo de Suelos y preparación de muestras. Publicación clave: INIFAP/CIRNE/A-487 MX-00310391-52-03-13-12-23. México (MX). 2 pp.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2017. Manual de manejo agronómico para cultivo de melón. Boletín INIA n° 01. Chile (CL). ISSN 0717-4829. 92 pp.
- López, Y., 2000. Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera. Colombia (CO). ISBN: 958-8095-05-0. 90 pp.
- Maas, E., Hoffman, G., 1984. Crop salt tolerance – current assessment. U.S Departamen of Agriculture. Estados Unidos (EU). 42 pp.
- MacFaddin. J. 2003. Biochemical tests for identification of medical bacterial. 3ª edición. Uruguay (UY). ISBN 950-06-1572-X. 839 pp.
- Martínez, A., Ramírez, J. 2005. Desarrollo actual de la Geoestadística en el mundo. Minería y Geología, vol. 21. n° 4. Colombia (CO). ISSN 0258-5979. 22 pp.
- May, J., Ortega, H., Can, A., 2016. Calidad del agua para riego agrícola del sistema hidrográfico Lerma-Chapala-Santiago. México (MX). 14 pp.
- Medina, E., Mancilla, O., Larios, M., 2016. Calidad del agua de riego y suelos agrícolas de Tuxcacuesco, Jalisco. Vol. 34. México (MX). 10 pp.
- Ministerio de Agricultura (MAG). 2004. La salinidad de los suelos y sus efectos en la agricultura. Ecuador (EC). 32 pp.
- Molina, E. 2001. Manejo de suelos y fertilidad de café. Fertilidad de Suelos y Manejo de la Nutrición de Cultivos en Costa Rica. Universidad de Costa Rica: Centro de Investigaciones Agronómicas: laboratorio de suelos y foliares. Costa Rica (CR). 142 pp.
- Montero, J., Larraz, B., 2008. Introducción a la Geoestadística lineal. España (ES). ISBN: 978-84-9745-347-9. 139 pp.
- Morín., C. 1980. Cultivo de cítricos. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú (PU)
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. 2002. Diario Oficial. Segunda Sección. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México (MX). 73 pp.

- Norma Oficial Mexicana NOM-44-072-SCFI-2001. 2001. Análisis de agua – determinación de Dureza Total en Aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Diario Oficial. Segunda Sección. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México (MX). 19 pp.
- Ojeda, D., Rodríguez, A., López, R., Leyva, A., García, S., 2012. Aspecto a considerar por los viticultores de Chihuahua en la nutrición de vid para vino. México (MX). 7 pp.
- Ojeda, W., 1999. Pronóstico del riego en tiempo real. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2ª ed. 230 pp.
- Oster, J., Schroer, W., 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 444-447 pp.
- Otero, L., Alden, F., Gálvez, v., 2007. Caracterización y evaluación de la salinidad. Cuba (CU). R. 1689-2007. 9 pp.
- Palacios, A., Rodríguez, M., Barajas, G., 2010. Tratamiento electrostático (ESP) del agua para riego. México (MX) 6 pp.
- Richards, L., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural Handbook 60. Estados Unidos (EU). 160 pp.
- Rucks, L. García, F., Kaplán, A., Ponce, J., Hill, M., 2004. Propiedades físicas del Suelo. Uruguay (UY). Universidad de la República de Uruguay. Facultad de Agronomía. 68 pp.
- Sadeghian, S., 2012. Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiable en suelos de la zona cafetalera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica L.*) en la etapa de almácigo. [Tesis Doctorado. Ciencias Agropecuarias] Colombia (CO): Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 181 pp.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2010. Salinidad del Suelo. México (MX). 59 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. Suelos. México (MX).
- Seguin, G. 1980. Influence des facteurs naturels sur le caractère des vins. In "Science et technique de la vigne", Tomo I, Francia (FR).
- Sumner, M., 1999. Handbook of Soil Science. Estados Unidos (ES). ISBN 0-8496-3136-6
- Sela, G., 2017. El cloruro en las Plantas, Agua y Suelo.
- Sierra, C., Céspedes, R., Osorio, A. 2001. Caracterización de la salinidad de los suelos y aguas del valle del río Copiapó. Boletín INIA n° 70. Chile (CL). ISSN 0717-4829.

- Taboada, J., Cotos, J., 2005. Sistemas de información medioambiental. España (ES). ISBN: 84-9756-056-6. 242 pp.
- Valdés, A., Palma, J. 2017. Características nutricionales y edáficas de principales frutales en Chile. SQM. The Worldwide Business Formula. Chile (CL). 208 pp.
- Van Leeuwen, C., Seguin, G. 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion 1990). Journal International Sciences de la Vigne et du Vin 28, 81-110 10 pp.
- Vaquero, M., 2014. Guía de curso: El riego y drenaje en la agricultura. Universidad EARTH. Costa Rica (CR). 99 pp.
- Villarías, J., Álvarez, J., Garzón, E., 2011. Carencias nutricionales y síntomas producidos en los distintos órganos de la vid. 4 pp.

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DIFERENCIAL DE VEGETACIÓN NORMALIZADO (NDVI) CON EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES.

3.1 Tecnologías geoespaciales en el campo de la agricultura de precisión

Actualmente las tecnologías geoespaciales se han desarrollado a un ritmo trepidante; la era de los vehículos aéreos no tripulados (VANT), comúnmente conocidos como drones, forman parte de las tecnologías en desarrollo señaladas y han influido positivamente en la vida del hombre. Los VANT's presentan variaciones de tamaño, forma, autonomía y propósitos, las cuales van en función del sensor que se incorpore y el objetivo de su uso, además de que su control puede ser manual, automático o ambos (Ojeda *et al.*, 2017; García, 2017). Los sensores instalados en los VANT's tienen la capacidad de captar imágenes o datos en tiempo real de las zonas de interés, las herramientas tecnológicas que se emplean son sistemas de posicionamiento, sensores climáticos, velocímetros, cámaras multiespectrales e hiperespectrales, etc. La información generada a partir del monitoreo en campo de las variables de interés es captada por los sensores de almacenamiento en un formato digital a partir del cual se obtiene información valiosa, misma que se equipara a los conocimientos técnicos y científicos para lograr una interpretación certera de lo que sucede en campo (Heras y Sánchez, 2017).

La percepción remota o Teledetección es la ciencia y arte de captar información de objetos, áreas o fenómenos a través del análisis de datos obtenidos mediante dispositivos que no están en contacto directo con el objeto de estudio (CONAGUA, 2005). Anteriormente la teledetección trabajaba únicamente con imágenes satelitales (Sobrino, 2000), sin embargo, hoy en día se encuentra en constante expansión hasta el punto de trabajar con imágenes obtenidas de sensores postrados en VANT's, mismos que permiten captar información en tiempo real de una infinidad de variables ambientales y naturales de las zonas de interés (Ojeda *et al.*, 2016), desde el uso en control de calidad del aire, aplicaciones cartográficas, prospección, explotación de recursos minerales, aplicaciones hidrológicas, forestales, agrícolas, impactos ambientales, mantenimiento, búsqueda, entre otras (Barrientos *et al.*, 2016).

En la actualidad la ciencia agrícola se apoya en técnicas de percepción remota con el uso de los VANT, las herramientas de sistemas de información geográfica (SIG), sensores que forman parte de estaciones meteorológico-climáticas, Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y cartografía de terreno, para contribuir en las tareas comprendidas de la Agricultura de Precisión (AP) (Norton y Swinton, 2000).

La AP como es un concepto en el ámbito de la economía y productividad agrícola que permite la toma de información en campo con el uso de tecnologías geoespaciales, análisis de resultados y toma de decisiones, basadas en la variabilidad espacial (comprende diferencias puntuales de las

variables analizadas en distintas secciones del terreno) y temporal (engloba diferencias observadas en el terreno en diferentes temporadas de producción) de las variables en estudio (Ariel y Campanella, 2007; Castellanos y Morales, 2016); las variables estudiadas están relacionadas con el monitoreo de sanidad, plagas, enfermedades y nutrición en el sector productivo y son las mismas que determinan los rendimientos y la calidad del producto final (INCyTU, 2018).

El objetivo principal de la AP es ofrecer al productor agrícola información puntual de las condiciones locales de las zonas de producción, información que se considera en la toma de decisiones de manejo, técnicas económicas y ambientales, de manera que permiten la resolución de problemas, el incremento en los rendimientos del cultivo, la optimización de recursos que concluye en la disminución de costos de producción y la reducción de impactos ambientales (Bramley, R. 2009; IICA, 2014), lo anterior puede lograrse si se proporciona información certera para realizar las labores de campo adecuadas, con los insumos apropiados, en el momento indicado y sitio correcto (García y Flego, 2014).

3.1.1 Tecnologías aplicables en agricultura de precisión en vid

En el cultivo de la vid existen un sinnúmero de problemas asociados a la calidad y a los rendimientos del producto final, dando pie a la generación de alternativas con tecnologías asociadas que permiten medir, identificar, cuantificar y visualizar las problemáticas presentes en campo y contribuyen a la generación de soluciones correctivas o preventivas (Best y Zamora, 2008).

Problemas asociados a calidad

Color de baya: el producto no logra obtener el color ideal del varietal por causas de deficiencia de nutrientes o una mala relaciones de la biomasa y fruto; la tecnología asociada a la determinación de este problema es la medición de parámetros de calidad con el uso de imágenes digitales para la medición del Índice de Área Foliar (IAF), NDVI, segmentación de la canopia, etc.

Quemadura de sol: se refiere a la sobreexposición del racimo a los rayos solares por falta de biomasa y estrés hídrico en la planta, con un cambio de coloración en la baya; el uso de imágenes digitales tomadas desde un satélite o por un VANT para la determinación de sanidad y vigor con el uso de índices de vegetación como NDVI, determinación de evapotranspiración, o condición termal de la superficie.

Pudrición de baya: se presenta por la incidencia de plaga o enfermedad en la planta, afectándose directamente la sanidad de la planta y la calidad del cultivo. Se trabaja con la tecnología asociada a la percepción remota de plagas, enfermedades y sanidad del cultivo, como el NDVI, condición termal de la superficie, fluorescencia, etc.

Problemas asociados al rendimiento

Daño por heladas: se da cuando se presentan bajas temperaturas prolongadas, mismas que dañan los brotes de la planta, causando pérdidas en la producción, se relaciona con la tecnología de percepción remota y con el uso de índices de vegetación, determinación de evapotranspiración, o condición termal de la superficie.

Deficiencia de vigor en planta: plantas débiles que no tienen la capacidad de sustentar la producción, ya sea por deficiencia de nutrientes, estrés hídrico, salinidad, sodicidad o toxicidad. Para la determinación de la deficiencia de vigor de un cultivo se trabaja con la tecnología asociada a la percepción remota con el uso de imágenes que permitan determinar índices como el NDVI, NDWI, CWSI, relación infrarrojo medio e infrarrojo cercano (IRMYC), estatus hídrico, determinación de evapotranspiración, o condición termal de la superficie (Best *et al.*, 2014; Best y Zamora, 2008).

3.1.2 Caracterización del VANT y sensores utilizados

Para el presente trabajo de investigación se trabajó en colaboración con la empresa “Geodrones Ingeniería + Consultoría”, quienes fueron los responsables de llevar a cabo los vuelos con un VANT sobre la zona de estudio.

Se determinaron 3 fechas de vuelo para cada una de las fincas en estudio, las cuales se describen a continuación.

Cuadro 19. Fechas de vuelo en la zona de estudio.

Finca de vuelo	Fecha de vuelo
Finca 1	28 de septiembre del 2017
Finca 2	15 de noviembre del 2017
Finca 1	20 de diciembre del 2017
Finca 2	31 de enero del 2018
Finca 2	28 de mayo del 2018
Finca 1	21 de junio del 2018

Las fechas de vuelo se determinaron respecto al ciclo vegetativo y reproductivo de la vid de la zona en estudio, además de tomar en cuenta condiciones ambientales como, precipitación, nubosidad, viento, radiación solar, etc.

Descripción del VANT

El VANT utilizado en el desarrollo de los vuelos es PHANTOM 3 PROFESSIONAL, aeronave de vuelo seguro, responsable e inteligente.

PHANTOM 3 PROFESSIONAL es un equipo fácil de pilotar, desde el despegue hasta el aterrizaje presenta un fácil control y responde ordenes complejas que permite garantizar un vuelo estable y seguro.

La memoria del PHANTOM 3 recuerda los detalles de los vuelos que realiza, la ruta, el tiempo, la distancia, la velocidad y la localización, ya que su memoria es de gran capacidad y además cuenta con la oportunidad de expansión de memoria (Dji. ENTERPRISE. 2018).

El inconveniente que se presentó durante la ejecución de los vuelos, fue la corta duración de la batería del VANT utilizado, lo que provocó retrasos en la toma de las imágenes y la cancelación de un par de vuelos, mismos que se repitieron al día siguiente. El tiempo de uso de las baterías de los VANT aún es muy corto, no mayor a 25 min, por lo que se recomienda contar con más de una batería para no retrasar la ejecución.



Figura 59. Aeronave PHANTOM 3 PROFESSIONAL.

Cuadro 20. Especificaciones de la aeronave PHANTOM 3 PROFESSIONAL.

Variables	Especificación
Peso total de la aeronave	1280 g
Velocidad de ascenso	5m/s
Velocidad de vuelo	16m/s
Tiempo de vuelo	23 min
GPS	Incluido
Cabeceo	-90° a + 30°

Descripción del sensor RGB

El sensor RGB utilizado para las tomas de imagen en la zona de estudio fue el original del VANT PHANTOM 3 PROFESSIONAL, sensor que lleva por nombre Sony EXMOR 1/2.3 CMOS. El sensor cuenta con una resolución espectral del espectro visible, rojo (R), verde (G) y azul (B) y tiene la capacidad de registrar radiación electromagnética en varias longitudes de onda catalogándose como un sensor multiespectral, captando una longitud de onda de 0.4 a 0.7 μm (Dji. ENTERPRISE. 2018).

La resolución espectral de un sensor se expresa por su condición de separar señales de longitud de onda diferentes, dependiendo del filtro óptico el cual es el encargado de clasificar la radiación incidente en bandas espectrales de diferentes tamaños; la resolución espectral está determinada por el número y ancho de bandas que se registran por el sensor, cuan más grande sea el ancho de banda mayor será la resolución espectral (Sobrino, 2000).

El sensor 1/2.3 CMOS presenta un sistema compacto y fácil de usar con una calidad de 12.4 megapíxeles con un resultado nítido y limpio, una resolución espacial (pixel) de 2 a 5 cm catalogada como una resolución muy alta, siendo de este tamaño el objeto más pequeño que se puede distinguir en una imagen (Dji. ENTERPRISE, 2018; Sobrino, 2000).

La resolución espacial de un sensor está dada por el campo de visión instantáneo y se define como la sección angular, medida en radianes, observada en un momento dado; la resolución espacial depende de la altura del sensor con respecto a la zona de estudio, el ángulo de visión, velocidad de exploración y las características propias del sensor utilizado; ésta resolución es un concepto clave, ya que determina el nivel de detalle que ofrece la imagen, entre más pequeño sea el tamaño del pixel mejor resolución y detalle tiene la imagen. La resolución es clasificada en función de su mejora, desde muy alta, alta, media o baja resolución, la resolución espacial es una vía que facilita la interpretación de variables en estudio con más facilidad y detalle, al presentar una alta y muy alta resolución (Sobrino, 2000).



Figura 60. Sensor RGB 1/2.3 CMOS.

Cuadro 21. Especificaciones del Sensor RGB 1 / 2.3 CMOS.

Variables	Especificación
Sensor	Sony EXMOR 1/2.3 CMOS
Lente	94° 35 mm enfoque a ∞
Velocidad de obturador	8 s a 1/8000 s
Modo de fotografía	Disparo único Ráfaga 3/5/7 disparos
Modo de vuelo	UHD FHD HD 2.7 K
Almacenamiento	Micro SD 64 GB
Formato de archivo	FAT 32 – exFAT .csu

Descripción del sensor R + NIR

El sensor MAPIR versión Survey2 cuenta con una resolución espectral conformada por 2 bandas, roja (R) e infrarrojo cercano (NIR) y una resolución espacial de 3 a 6 cm dependiendo de la altura del sensor con respecto a la zona de estudio, el ángulo de visión y velocidad de exploración. MAPIR versión Survey2 cuenta con un lente nítido que permite capturar fácilmente medios aéreos, presenta un tamaño similar a una GoPro® con una resolución de 16 megapíxeles (MAPIR, 2018).



Figura 61. Sensor MAPIR Survey2.

Cuadro 22. Especificaciones del Sensor R+NIR Survey2.

Variables	Especificación
Sensor	Sony Exmor IMX206 16MP
Lente	82° 23 mm -1% de distorsión
Velocidad de obturador	3 s
Peso	47 g
Almacenamiento	Micro SD 128 GB
Formato de archivo	.csu

3.2 Descripción de los parámetros considerados para los vuelos en campo desde un VANT.

Conocer información sobre las condiciones meteorológicas en tiempo real de la zona de estudio permite realizar una planeación de un vuelo con un VANT libre de riesgos, ya que existen drones que carecen de resistencia a las malas condiciones climatológicas como, altas temperaturas, precipitación, nubosidad y vientos fuertes. El conocimiento de las condiciones ambientales son requisito para realizar operaciones seguras y eficientes, de lo contrario se presentan riesgos comunes como la nula captación de la información, obtención de imágenes de mala calidad, riesgo de accidentes y pérdida de los equipos.

La variable temperatura es considerada en los parámetros de vuelo, ya que los sensores y el dron utilizados trabajan con intervalos de temperatura de 0° C a 40° C, fuera de éste rango la calidad de la toma y el funcionamiento de los equipos se ven afectados (Dji. ENTERPRISE, 2018; MAPIR, 2018).

La presencia de precipitación al momento del vuelo interfiere con el vuelo en campo, ya que la mayoría de los VANT carecen de sistemas contra la humedad y se ve afectado el funcionamiento del equipo (Dji. ENTERPRISE, 2018).

La variable de nubosidad es fundamental en la planeación del vuelo, ya que su presencia en el área de vuelo impide la apropiada captación de la energía reflejada, misma que es captada por el sensor. La presencia de nubosidad es uno de los mayores inconvenientes que se presentan en la percepción remota (Galindo *et al.*, 2014).

Los vientos fuertes y movilidad de polvo al momento de llevar a cabo una ruta de vuelo es un inconveniente en la toma de la información, ya que logra desviar la ruta de vuelo del VANT y las imágenes pueden verse afectadas por el movimiento y desfase, se recomienda no volar con condiciones de viento mayores a 10 m/s (Dji. ENTERPRISE, 2018).

Los vuelos desarrollados en la zona de estudio se planearon tomando en consideración las condiciones ambientales presentes en la zona de estudio durante etapas de interés del ciclo vegetativo y reproductivo de la vid (final de vendimia, agostamiento, inicio de reposo invernal, agostamiento completo-final de reposo invernal, floración-cuajado y enero).

Las condiciones ambientales consideradas fueron: velocidad del viento (menor a 5 m/s) y presencia mínima de polvo, sin lluvia, nubosidad menor a un 15% con intervalos soleados en los meses de noviembre y diciembre, el resto de los meses en estudio se presentaron días totalmente soleados con una radiación neta no mayor a 25 MJ m^{-2} , las temperaturas presentes en los días de vuelo no estuvieron por encima de los 35°C .

3.3 Descripción de las etapas de un vuelo para restitución de imágenes

El mapeo de la zona de estudio es un requisito indispensable en la agricultura de precisión, ya que logra estudiar los fenómenos de interés de manera espacial y temporalmente. Existen dos tipos de mapeo en campo, el mapeo in situ y el mapeo remoto; en el mapeo in situ se trabaja con variables que son detectadas bajo el método de observación en campo y se realizan los registros sobre las incidencias que se percatan, sin embargo, éste proceso no siempre es viable o posible, ya que cuando el área de interés es muy grande la posibilidad de recorrer toda la zona y observarla a detalle se dificulta, la falta de visión de los puntos más altos o la imposibilidad de detectar las manifestaciones de la planta, son los actos más comunes en este tipo de mapeo, de ahí que el proceso más viable para mapear una zona productiva es el método donde se utiliza la percepción remota, la cual se define como un conjunto de técnicas que permiten recopilar, registrar y procesar información de la variable de interés (IICA, 2014).

La percepción remota se divide en dos etapas fundamentales: la adquisición de datos mediante los sensores (planeación y ejecución de vuelo) y el análisis de datos, sin embargo, para que una imagen pueda ser interpretada adecuadamente requiere de un preprocesamiento y un procesamiento para que sean útiles como una herramienta (IICA, 2014; INTA, 2000)

La Figura 62 muestra las etapas que culminan en la obtención de una imagen de calidad para su posterior procesamiento, a fin de generar información confiable que permita una interpretación adecuada. La planeación de un vuelo con un VANT, su ejecución y el preprocesamiento de la información obtenida en campo, son las etapas que conforman el desarrollo de la información.

Planeación de la misión el vuelo

La planeación de la misión del vuelo es la parte más importante en el proyecto de investigación, ya que de esta depende que la ejecución del vuelo sea exitosa. La planeación se realiza desde las oficinas, en donde se identifica, determina y delimita la zona de estudio, se aproxima el área de cobertura de vuelo, se verifican las condiciones del terreno y se determina la zona de despegue, una vez analizadas todas las variables anteriores se realiza el plan de vuelo.

Cuadro 23. Variables presentes en los tiempos de vuelo.

Variable	Finca 1	Finca 2
Altura de vuelo	80 m	75 m
Sobre-posición de imagen	80% lateral 60% frontal	80% lateral 60% frontal
Velocidad de vuelo	7 m/s	8 m/s
Tiempo de vuelo	19-25 min	13-18 min

El plan de vuelo está conformado por la determinación de las líneas de vuelo, las cuales van en función del área de estudio, el objetivo del vuelo y el tiempo de disposición; la altura de vuelo es determinada a partir de la resolución espacial que se desea tener, el tipo de línea de vuelo y el tiempo de disposición de las baterías; el traslape de las fotografías es una parte fundamental en la planeación, ya que de ésta depende el grado de información y confiabilidad que se genere a partir de la toma y está en función de la línea y altura de vuelo; la determinación de la velocidad de vuelo se establece a partir de la capacidad de vuelo del dron, las baterías con las que se cuenta y la velocidad del obturador de los sensores utilizados (Ojeda *et al.*, 2016).

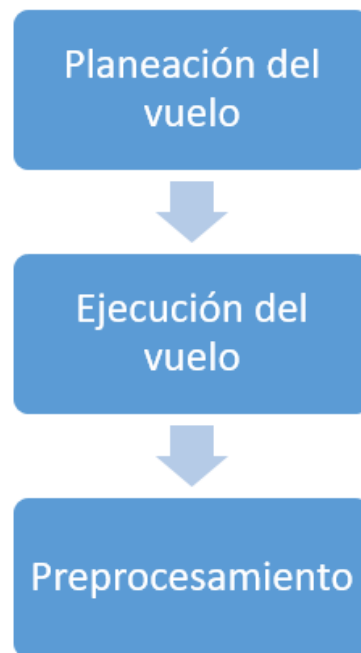


Figura 62. Metodología del proceso de vuelo con un VANT para restitución fotogramétrica.

La altura de vuelo establecida para la zona de estudio y la calidad de los sensores utilizados, permitió obtener una resolución espacial de 2 y 4 cm en el sensor RGB y NIR+R, respectivamente; la velocidad del vuelo permitió ejecutar el proceso en un tiempo no mayor a 25 min por finca en estudio.



Figura 63. Planeación de misión de vuelo.

Ejecución de la misión de vuelo

Para que la segunda etapa del proceso se cumpla satisfactoriamente es necesario establecer puntos de control antes de ejecutar el vuelo en la zona de interés. De modo que éstos se determinaron con receptor geodésico GPS de alta precisión, el cual logra ubicar con mayor exactitud los puntos de referencia en sus tres posiciones (X, Y, Z) y concluir en una georreferenciación correcta de las imágenes de interés. La segunda etapa del proceso es la ejecución del vuelo, y para desarrollarla con satisfacción es necesario realizar un recorrido para identificar posibles obstáculos en la zona, como cables, árboles, construcciones, torres, etc., que pudiesen limitar la ejecución del vuelo; una vez realizado el recorrido se establecen puntos de referencia (dianas o cuadros con patrones) que faciliten su localización y determinación de coordenadas para ser utilizados como correctores de georreferencia. Una vez concluida la determinación de puntos de control se delimita una zona de ensamblado y despegue, ésta debe de ser un área despejada y con suficiente espacio para realizar maniobras de funcionamiento y despegue. Al identificar la zona de despegue se delimita la zona y se realiza el ensamblado del equipo, una vez listo se pone el VANT en el aire y se ejecuta el vuelo (Ojeda *et al.*, 2016).

El número de vuelos en la ejecución está en función de la calidad del sensor utilizado, la duración de la batería, el porcentaje de sobre-posición de la imagen, la velocidad y altura de vuelo.



Figura 64. Ejecución de misión de vuelo.



Figura 65. Proceso de ejecución de vuelo en zona de estudio.

Preprocesamiento de la información

Para poder llevar a cabo el procesamiento de las imágenes y dar una interpretación a la información obtenida, ésta debe ser preprocesada anteriormente; el preprocesamiento consta de realizar correcciones pertinentes a las imágenes brutas, ya que son solamente una matriz de información de píxeles en escala de grises los cuales deben de ser clasificados para su interpretación (IICA, 2014; Ojeda *et al.*, 2016).

Una vez concluido el vuelo se realizó la descarga de la información. Para el caso de las imágenes RGB se trabajó en el software PHANTOM 3 PROFESSIONAL, la información descargada se presenta en formato .csu, el cual debe ser convertido en .gpx para presentar compatibilidad con la mayoría de los software y poder trabajar la información apropiadamente; la información obtenida del sensor NIR + R fue descargada en el software MAPIR y en él fue convertido el formato .csu a .gpx. Seguidamente de la conversión de los archivos se realiza la rectificación de las coordenadas de las imágenes (corrección geométrica), éste es el paso principal y el más indispensable para analizar información espacialmente. El VANT y los sensores utilizados en el proyecto cuentan con un GPS que ayuda a la georreferenciación, sin embargo, el uso de los puntos de control y las dianas en campo contribuyen a que las fotografías presenten una correcta georreferenciación; para ambas imágenes RGB + NIR – R se realiza la georreferenciación individual en el software FIJI.

El segundo paso es realizar correcciones radiométricas y atmosféricas, ambas correcciones se llevan a cabo en los softwares FIJI y MAPIR. En la corrección radiométrica se discriminan los ruidos presentes en las imágenes, tales como píxeles dañados o con información errónea, la cual es calculada por los datos vecinos más cercanos y filtros digitales (IICA, 2014).

La corrección atmosférica se encarga de reducir los efectos que intervienen en la atmósfera para generar una condición limpia que permita interpretar adecuadamente las imágenes, se corrige y discrimina la información como viñetas, polvo, sombras o nubosidad, según sea el caso (IICA, 2014).

Una vez concluidas la correcciones radiométricas, atmosféricas y geométricas pertinentes, es posible la generación de un ortomosaico de la zona muestreada; una vez corregidas las imágenes, el proceso de unión entre ellas es más rápido y el mosaico resultante corresponde a la proyección horizontal del terreno en estudio (IICA, 2014), éste proceso se realiza en el software PIX4Dmapper. Como último paso se realiza una verificación de la georreferencia del ortomosaico generado, se comprueba utilizando los puntos de control y las dianas establecidas en campo en un primer tiempo. Seguidamente de la generación del ortomosaico bajo los parámetros del preprocesamiento se puede realizar el procesamiento de la imagen, ya sea la interpretación básica de las imágenes, la asociación con parámetros cuantitativos o cualitativos registrados de variables de interés de campo o el procesamiento de la información basándose en índices tales como: NDVI, NDWI, CWSI, IRMYC etc.

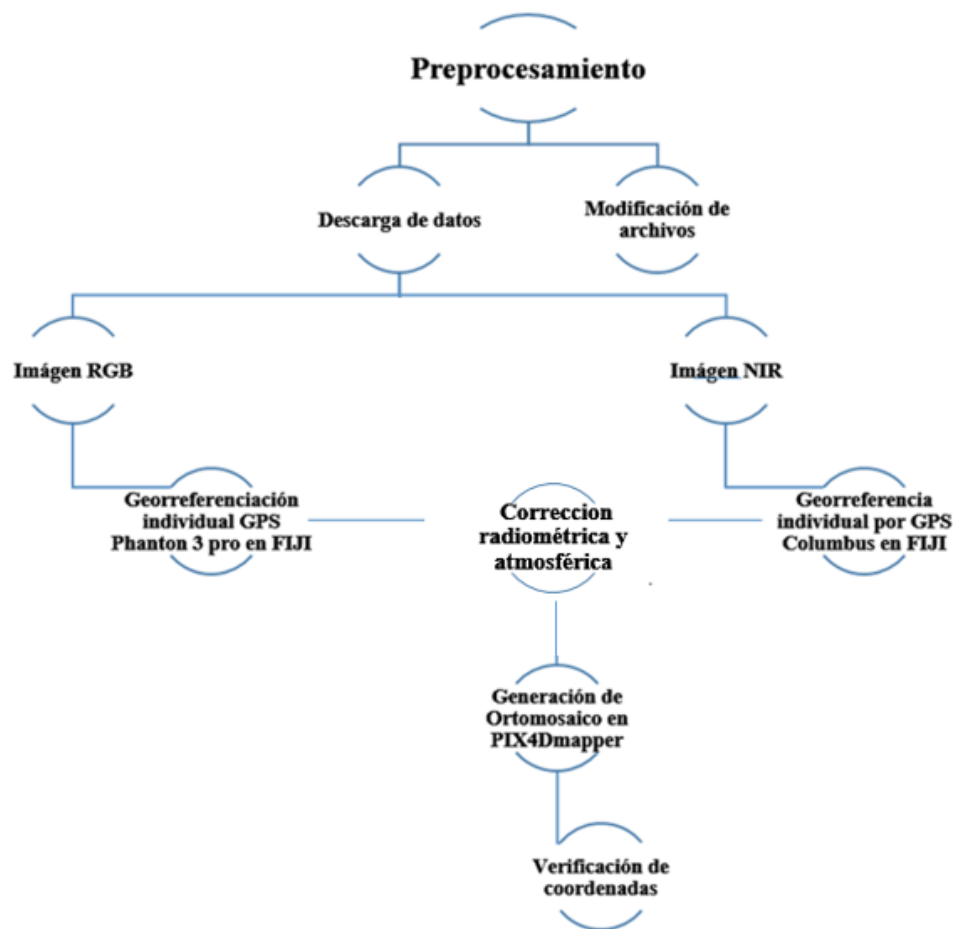


Figura 66. Preprocesamiento de la información de vuelo.

3.4 Índice Diferencial de Vegetación Normalizado (NDVI)

El recurso hídrico y nutrición de suelos son variables indispensables para el desarrollo apropiado de una planta ya establecida y adaptada a las condiciones meteorológico-climáticas. El sector vitivinícola presenta un grado de resistencia a circunstancias de baja disponibilidad hídrica, ya que la planta tiene una gran capacidad de adaptación, además de desarrollar elementos anatómicos y morfológicos, como largas raíces y regulación estomática (Koundouras *et al.*, 1999) que contribuyen a resistir la deficiencia hídrica. La planta de vid también presenta una adaptación a suelos con deficiencia de nutrientes, ya que su objetivo principal producir vid de calidad con condiciones organolépticas favorables para la producción de vino, y se deja de lado el incremento de los rendimientos. Bajo la necesidad de conocer la variabilidad de un viñedo respecto a la nutrición de suelos, estatus hídrico y vigorosidad de la vegetación, existen metodologías establecidas para medir las variables de interés, una de ellas es a través del uso de imágenes multiespectrales y su correlación con datos cuantificados en campo y laboratorio.

A partir de las imágenes multiespectrales preprocesadas se pueden identificar condiciones de vigorosidad de la vegetación, sin embargo, si no se realiza un realce a la imagen la interpretación de la información puede ser errónea, por lo tanto las técnicas del preproceso logran mejorar la calidad del ortomosaico; también la calidad de la imagen es bastante importante, ya que permite identificar atributos que no son del todo visibles en un primer momento, de manera que existen técnicas que logran destacar las condiciones propias de las imágenes tales como: modificación en histograma, filtros digitales, composiciones de color, análisis de componentes, y una de las técnicas más importantes es la elaboración de imágenes sintéticas denominados Índices de Vegetación (IV) (IICA, 2014).

Un índice de vegetación es un parámetro que se basa en la combinación de diversas bandas espectrales que logran extraer la información relacionada con la vegetación y excluir factores externos como las propiedades de un suelo desnudo (Sobrinho, 2000). El objetivo de los IV es monitorear el desarrollo de la cobertura vegetal del cultivo de interés y evaluar condiciones de estrés causado por deficiencia hídrica, deficiencia nutricional, plagas y enfermedades, lo anterior permite obtener una representación exacta de la variabilidad del cultivo (IICA, 2014) y realzar las zonas con mayor vigor vegetal (Posada *et al.*, 2012).

El NDVI es el índice de vegetación más utilizado en el estudio del dosel de la vegetación, permite estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la canopia al analizar el valor de su «verdor». el verdor es obtenido con base a mediciones de la intensidad de radiación en ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación refleja, y es un indicador confiable del estado hídrico de la vegetación (Meneses, 2011; Bellvert y Girona, 2012; Tucker, 1979; Rouse *et al.*, 1973).

EL NDVI revela las condiciones fisiológicas de la planta, las cuales dependen en su mayoría del contenido de agua, además, es importante también realizar monitoreo en campo, ya que existen factores que pueden alterar la condición fisiológica del cultivo (Posada *et al.*, 2012).

El NDVI es el resultado de la combinación matemática de diferentes bandas multiespectrales, la banda del espectro rojo visible y el infrarrojo cercano son las utilizadas para el proceso. El índice en estudio se basa en la medición de la cantidad de energía absorbida y reflejada por el objeto de interés, realizando una comparación de la extracción de la cantidad de luz visible en el infrarrojo cercano de pertenencia al visible rojo y luego se divide por la cantidad de luz reflejada en ambas longitudes de onda (Posada *et al.*, 2012; Tucker, 1979).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Donde:

NIR: Banda Infrarrojo cercano

R: Banda rojo visible

Figura 67. Ecuación NDVI (Tucker, 1979).



Figura 68. Diseño descriptivo del NDVI en una planta sana y una planta seca.

El NDVI es un índice no dimensional y por lo tanto sus valores va desde -1 a +1, valores por debajo de 0.1 corresponden a cuerpos de agua y a suelo desnudo, valores bajos por encima de 0.1 y menores a 0.5 corresponden a la vegetación en periodo de senescencia, estrés o enferma y valores mayores a 0.5 son indicadores de la alta actividad fotosintética de la plantación (Meneses, 2011; Tucker, 1979).

La figura 68a muestra el grado de reflectividad y absorbancia que debe de presentar una planta no estresada, en donde las cubiertas vegetales muestran un baja reflectividad de luz en el rojo visible (mayor absorción por la clorofila) y una alta reflectividad de luz en el infrarrojo cercano (Rouse *et al.*, 1974).

La figura 68b presenta la condición de una planta bajo estrés hídrico, la absorbancia de la luz rojo visible sigue presentándose en mayor cantidad que la reflejada, sin embargo, muestra menor absorbancia que una planta no estresada, mientras que los valores de reflectividad y absorbancia del infrarrojo cercano se presentan de manera proporcional, lo anterior son rasgos característicos de una planta bajo estrés y en periodo de senescencia.

3.5 Determinación del NDVI e interpretación de mapas esquemáticos para seis etapas del ciclo vegetativo reproductivo de la vid.

La presente investigación constó de la planeación y ejecución del vuelo, preprocesamiento de imágenes y procesamiento de la información para la determinación del NDVI para seis etapas del ciclo vegetativo reproductivo del cultivo de la vid en zona de viñedos del municipio de San Luis Potosí.

Cuadro 24. Fechas de ejecución de vuelo y etapa del ciclo vegetativo reproductivo en función.

Finca de análisis	Fecha de vuelo	Etapa de ciclo vegetativo reproductivo
Finca 1	28 de septiembre del 2017	10 días después de la cosecha
Finca 2	15 de noviembre del 2017	Periodo de agostamiento (caída de poca hoja)
Finca 1	20 de diciembre del 2017	Inicio de reposo invernal
Finca 2	31 de enero del 2018	Término de reposo invernal
Finca 2	28 de mayo del 2018	Término de floración e inicio de cuajado
Finca 1	21 de junio del 2018	Envero

Para el procesamiento de la información se trabajó con el ortomosaico conformado por la banda rojo visible e infrarrojo cercano, la cuales, bajo una combinación matemática (Figura 67) son capaces de determinar el grado de vigorosidad de una planta con valores de NDVI que van desde -1 a +1 (Bellvert y Girona, 2012).

El procesamiento de la información se llevó a cabo en la extensión ArcMap 10.2 del software ArcGIS, utilizando la metodología propuesta por Tucker en 1979.

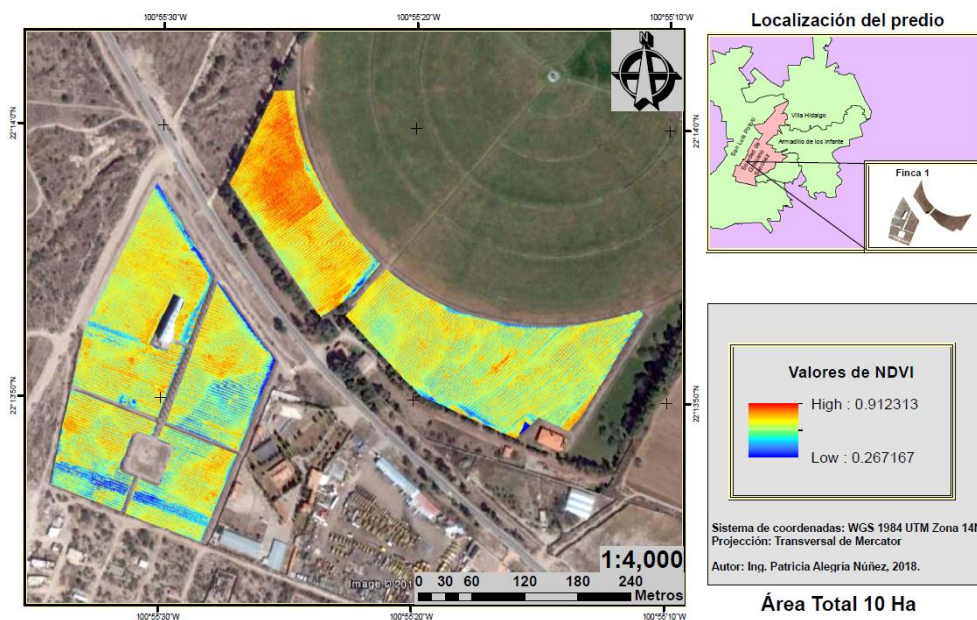


Figura 69. Determinación de NDVI para la Finca 1, pasando 10 días después de la cosecha. A 28 días del mes de septiembre del 2017.

El primer vuelo ejecutado para la investigación se llevó a cabo el día 28 de septiembre del 2017 en la Finca 1, el vuelo se ejecutó 10 días después de la cosecha de la vid (Figura 69). Presentaba un suelo a capacidad de campo, ya que se realizaron riegos constantes para la recuperación de la planta después de la cosecha, puesto que se dirigía a la etapa de agostamiento y reposo invernal, además, se presentaron lluvias a lo largo de 4 días previos al vuelo.

El vuelo se ejecutó bajo condiciones ambientales favorables, teniendo un 15% de nubosidad, una temperatura de 25°C con vientos de 0.83 m/s.

A lo largo de la Finca 1 se presentaron valores de NDVI de 0.267 hasta 0.912, los cuales son indicadores de una vigorosidad en gran parte de la zona de estudio. Las zonas de coloración azul (menores a 0) son determinadas como suelo desnudo (calles, caminos y zona sin planta), y los valores cercanos a +1 (coloración roja) se presentan en zonas en donde las plantas muestran un grado de mayor vigorosidad, entre ellos las variedades Merlot, Syrah y Sauvignon Blanc. Es necesario mencionar que el bloque donde se encuentra la variedad Merlot, presentaba un alto porcentaje de arvenses en etapa de desarrollo, de manera que el grado de vigorosidad se incrementó y se vio reflejado en el análisis de NDVI.

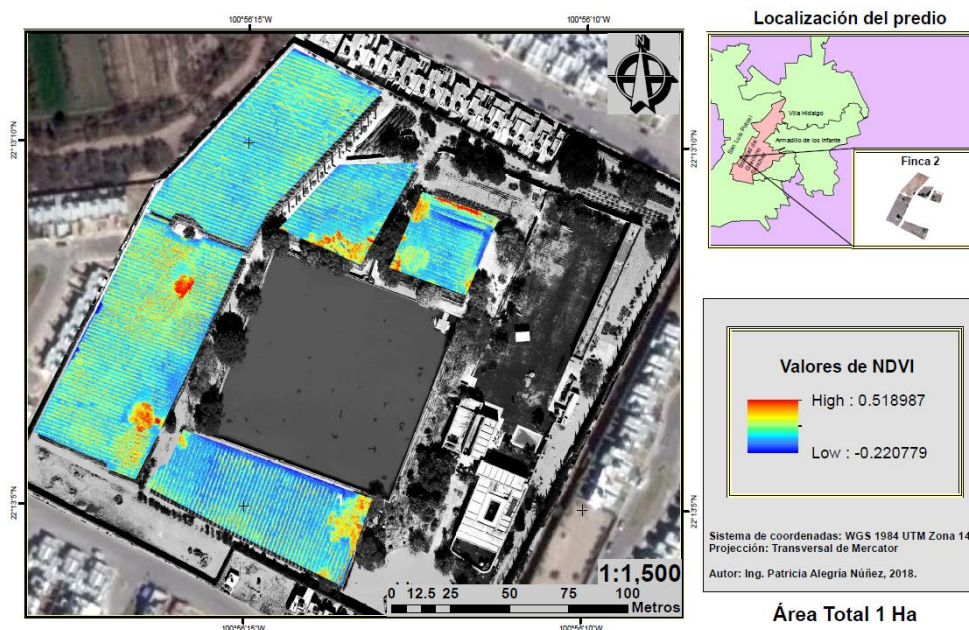


Figura 70. Determinación de NDVI para la Finca 2, en el periodo de inicio del agostamiento. A 15 días del mes de noviembre del 2017.

El segundo vuelo 2 corresponde a la Finca 2 realizado el día 15 de noviembre del 2017, seguido del frente frío número 9 en el que se registraron temperaturas menores a 5°C.

Se presentaron condiciones atmosféricas favorables, con una temperatura de 26°C al momento del vuelo, una velocidad del viento de 0.88 m/s, sin lluvia y sin nubosidad.

Los valores de NDVI oscilan desde -0.220 hasta 0.518, los valores máximos en el procesamiento corresponden a árboles presentes en la zona de estudio (coloraciones rojas), éstos presentaron mayor resistencia a las heladas del mes de noviembre, mientras que la vid presentó en un 55% de su área foliar quemaduras por frío, lo que logró inducir en tiempo el periodo de agostamiento y la preparación para el reposo invernal, lo que provoca que el índice de vegetación se presentara con valores de 0.1 a 0.3 (coloración amarilla), mientras que las tonalidades azules corresponden a suelo desnudo.

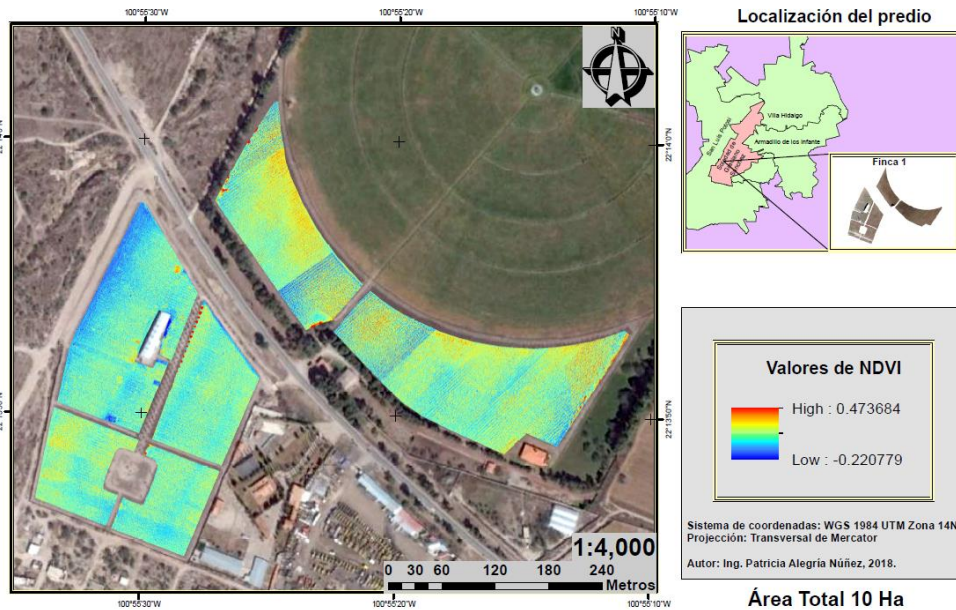


Figura 71. Determinación de NDVI para la Finca 1, en el periodo de inicio del reposo invernal. A 20 días del mes de diciembre del 2017.

El 20 de diciembre del 2017 se realizó el tercer vuelo y en la Finca 1, a inicio del reposo invernal, en donde el 100% de la plantación presentaba quemaduras por frío, lo que indujo el reposo invernal. La temperatura ambiental de la fecha del vuelo fue de 26.6 °C, no había presencia de nubosidad ni de lluvia, la velocidad del viento fue de 0.42 m/s. En general las condiciones atmosféricas presentes el día del vuelo fueron favorables para su ejecución.

Los valores de NDVI obtenidos en el tercer vuelo fueron de -0.220 a 0.473. Los valores más bajos corresponden a un suelo desnudo sin ningún tipo de vegetación, mientras que los valores positivos hacen referencia a la presencia de vegetación en la zona, sin embargo, solo corresponde a zonas que presentan arvenses que son resistentes a las temperaturas bajas y al estrés hídrico.

El cuarto vuelo se desarrolló en la Finca 2 el día 31 de enero del 2018, en esta fecha la planta se encontraba en el periodo de reposo invernal completo, no había presencia de vegetación en ninguna zona del área productiva y el 100% de la plantación presentaba un secamiento en el total de la biomasa.

La temperatura del día del vuelo fue de 20.8°C, la velocidad del viento fue de 0.16 m/s, sin presencia de precipitación ni nubosidad, por lo tanto, las condiciones ambientales fueron favorables para la ejecución del vuelo.

Los valores de NDVI calculados para el vuelo en estudio fueron de -0.571 hasta 0.257, el valor más negativo que se obtuvo a lo largo del análisis determina que el suelo de la zona de estudio se encontraba totalmente desnudo con una mayor exposición a la radiación y el sensor fue capaz de captar la energía reflejada por el suelo.

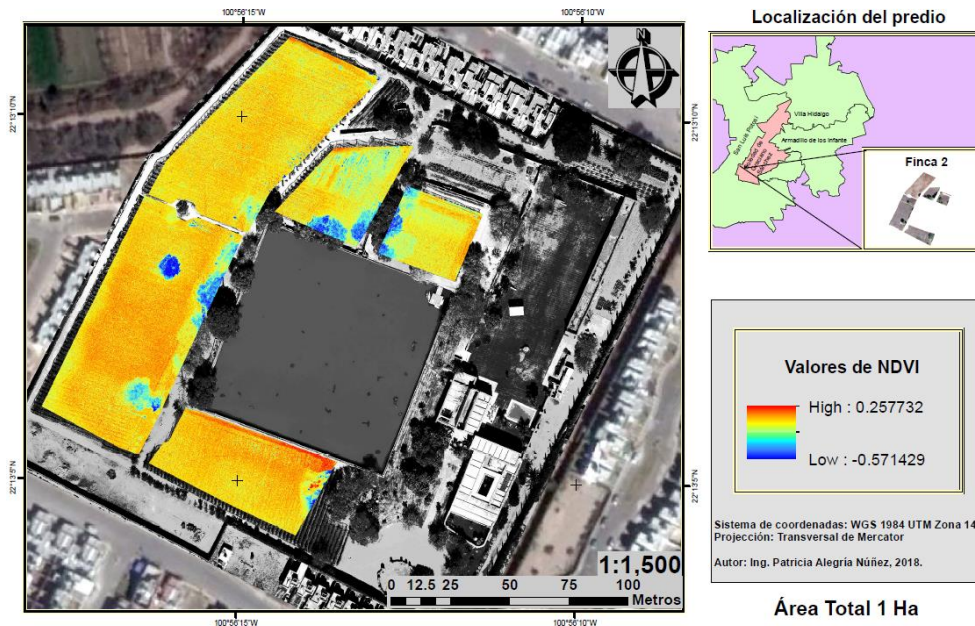


Figura 72. Determinación de NDVI para la Finca 2, durante el periodo final del reposo invernal. A 21 días del mes de enero del 2018.

El vuelo cinco se realizó el 28 de mayo del 2018 en la Finca 2, unas variedades presentaban presencia de floración y otras mostraban cuajado de fruto. Aunque en el proceso de floración y cuajado se deben de presentar riegos alternativos para un desarrollo favorable del racimo, de lo cual los suelos el día del vuelo no presentaban humedad. Las condiciones ambientales del día en estudio se encontraron apropiadas, ya que se presentó una temperatura de 34.1° C, con vientos de 1.17 m/s, no hubo presencia de lluvia ni nubosidad.

Los valores de NDVI para la fecha en mención se establecen en un rango de -0.090 hasta 0.576, los valores más bajos se refieren a las zonas que presentan suelo desnudo (calles, caminos y área sin planta). Cabe mencionar que los dos bloques superiores de la finca en estudio no cuentan con planta en producción, ésta fue retirada por presentar baja productividad.

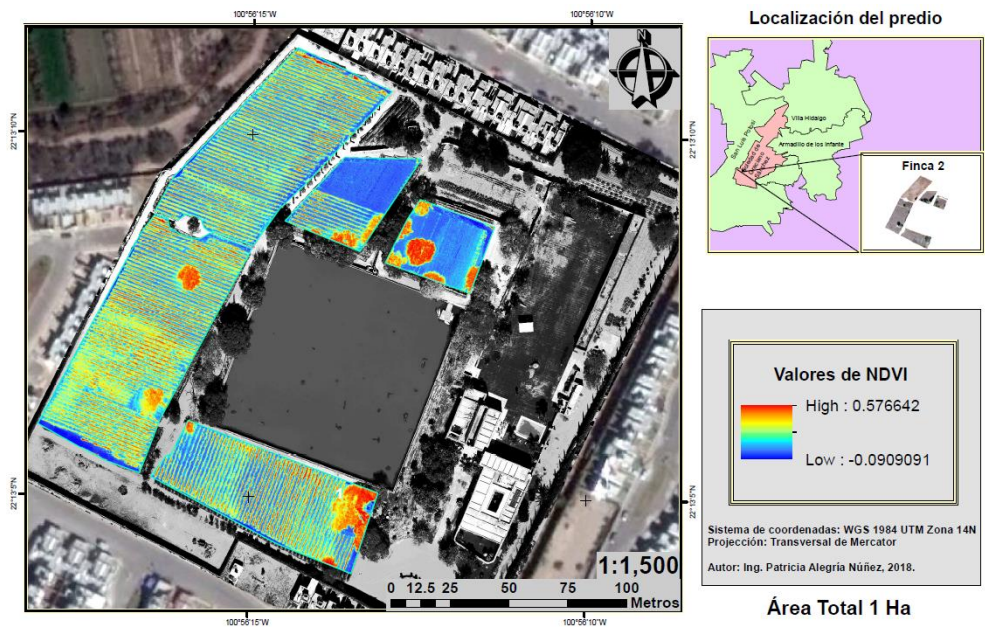


Figura 73. Determinación de NDVI para la Finca 2, en el término de floración e inicio del periodo de cuajado. A 28 días del mes de mayo del 2018.

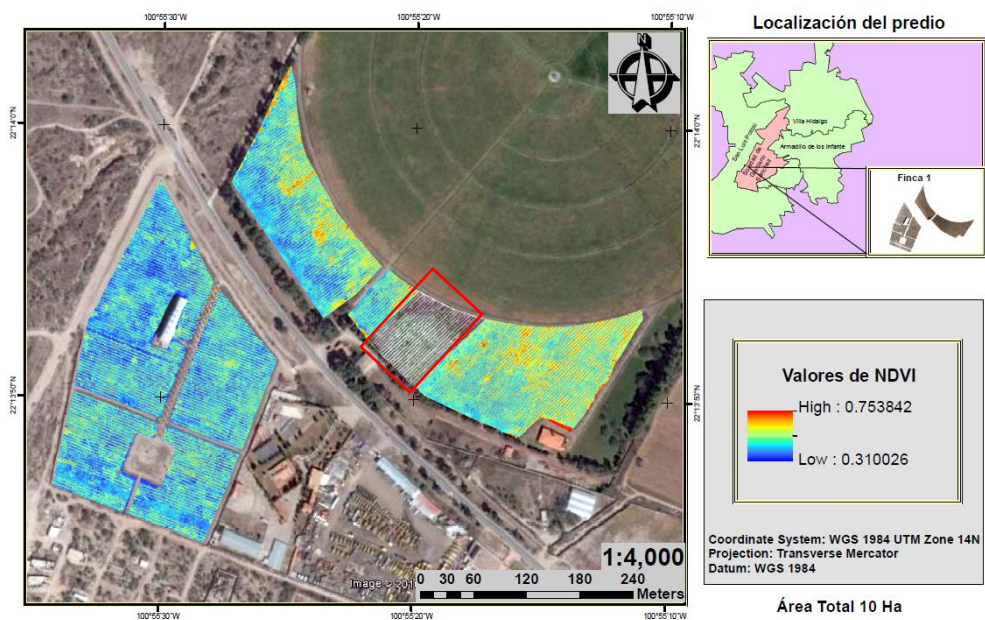


Figura 74. Determinación de NDVI para la Finca 1, durante la etapa de cuajado de fruto. A 21 días del mes de junio del 2018.

La Figura 74 muestra la variabilidad espacial del comportamiento del NDVI a lo largo de la Finca 1 en el día 21 de junio del 2018. Se observan valores de NDVI que van desde 0.310 hasta 0.753. La planta de vid presentó un valor promedio del índice de vegetación de 0.58 en el 80% de la zona de estudio, mientras que el 20% restante muestra valores cercanos a 0.65.

La zona que se presenta en el bloque de contorno rojo es donde se encontraba ubicada la variedad Malbec, misma que fue removida por presentar bajos rendimientos, por lo que se excluye del análisis de NDVI para el 21 de junio del 2018.

Para la fecha en estudio se esperaba obtener valores de NDVI por arriba de 0.80, sin embargo, la parte Oeste de la zona de estudio muestra un grado de estrés hídrico con valores de NDVI por debajo de 0.60, lo anterior se puede presentar por la ausencia de riego; mientras que el área Este presenta un mayor grado de vigorosidad con valores por encima de 0.65, sin embargo, la Finca 1 en general presenta un grado de estrés hídrico, lo que se atribuye a la ausencia de precipitación y riegos. Se infiere que los riegos fueron evitados con el objeto de controlar la brotación del dosel, favorece la acumulación de azúcares y metabolitos secundarios, los que contribuyen a la producción y calidad del fruto de la vid durante el periodo de cuajado y envero.

3.6 Conclusiones del capítulo 3

- ❖ El uso de la percepción remota es una tendencia de la tecnología geoespacial, misma que permite desarrollar y contribuir a los procesos del concepto de agricultura de precisión, lo que consiente en la toma de información en campo con el uso de tecnologías, análisis de resultados y toma de decisiones, basadas en la variabilidad espacial y temporal de las variables de interés, tales como monitoreo de sanidad, plagas, enfermedades y nutrición del sector productivo.
- ❖ Las principales áreas de interés en donde se aplica la agricultura de precisión en vid son problemas asociados a la calidad del fruto, como: tamaño, color, sanidad de la baya y problemas asociados a los rendimientos, tales como daños por heladas y deficiencias de vigor en la planta asociados a nutrición, estrés hídrico, salinidad, sodicidad y toxicidad.
- ❖ El uso de los vehículos aéreos no tripulados asociados a sensores capaces de registrar radiación electromagnética en varias longitudes de onda multiespectrales, forma parte de las tecnologías geoespaciales en desarrollo en la agricultura de precisión, la ventaja de éstas tecnologías es brindar información exacta del momento de la ejecución de vuelo, además que, la resolución espacial de las imágenes obtenidas es muy alta y permite observar a mayor detalle las características de interés.
- ❖ El NDVI es el índice de vegetación más utilizado para el estudio del dosel de la vegetación, logra identificar la cantidad, calidad y desarrollo del dosel, además de que permite evaluar las condiciones de estrés hídrico del cultivo.
- ❖ Los resultados analizados de NDVI se encuentran ligados directamente a los parámetros de humedad del suelo, en su mayoría el estrés que se determina al utilizar el NDVI corresponde a un estrés hídrico, seguido de estrés por nutrición.
- ❖ Si el cultivo no presenta un grado de estrés a lo largo de su desarrollo y se realiza un monitoreo temporal con el índice de vegetación, se logra expresar el ciclo fenológico de la planta en un grado de vigorosidad con el uso del NDVI, obteniendo valores negativos (-1 a 0.1) para zonas con vegetación muerta y suelo desnudo, valores de 0.1 a 0.2 muestran presencia de senescencia, condiciones de estrés por nutrición o hídrica y plantas enfermas presentan valores desde 0.2 a 0.5 y valores por encima de 0.5 y cercanos a 1 muestran una vegetación sana sin ningún grado de estrés.
- ❖ El NDVI presenta un incremento en su valor cuando aumenta la humedad en el suelo durante la fase de crecimiento de la planta, ya sea por riego o precipitación según Wang *et al.*, (2007), la cita anterior respalda el comportamiento de la planta en la zona de estudio al presentar mayor grado de NDVI para fechas con presencia de riego (sin estrés) y valores menores de NDVI para fechas de vuelo en las que se presentaba estrés hídrico (sin riego y sin lluvia).

- ❖ Los valores más altos de NDVI se presentaron en el mes de septiembre (0.91) al término de la cosecha, lo anterior se atribuye a que se presentaron riegos constantes después de la vendimia, con el objetivo de incrementar la sanidad y la recuperación de la planta y que ésta entrara en un estado de agostamiento y reposo invernal bajo las mejores condiciones, para lograr con esto una producción exitosa en el siguiente ciclo productivo.
- ❖ Los valores más bajos de NDVI se presentaron en el periodo de reposo invernal en el mes de enero, los valores oscilaron entre -0.57 y 0.25, en esta fecha el cultivo se encontraba en su totalidad bajo el periodo de reposo invernal, por lo que no había presencia de ningún tipo de vegetación y el suelo se encontraba totalmente desnudo.

3.7 Abreviaciones del capítulo 3

AP	Agricultura de Precisión
B	Banda Azul
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
CWSI	Índice de Estrés Hídrico de Cultivo
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
G	Banda Verde
IAF	Índice de Área Foliar
IICA	Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura
INCyTU	Oficina de Información Científica y Tecnológica para el congreso de la unión
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
IRMYC	Relación infrarrojo medio e infrarrojo cercano
IV	Índice de Vegetación
SIG	Sistemas de Información Geográfica
NDVI	Índice Diferencial de Vegetación Normalizado
NDWI	Índice Diferencial de Agua Normalizado
NIR	Banda Infrarrojo cercano
R	Banda Roja
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado

3.8 Bibliografía del capítulo 3

- Ariel, M., Campanella, O., 2007. AP-SIG: Un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión. Argentina (AR). 5 pp.
- Barrientos, A., del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., Rossi, C. 2016. Vehículos aéreos no tripulados para y uso civil. Tecnología y aplicaciones. España (ES). 29 pp.
- Bellvert, J., Girona, J., 2012. The use of multispectral and thermal images as a tool for irrigation scheduling in vineyards. España (ES). CIHEAM. Serie B. Etudes et Recherches, n° 67. 131-137 pp.
- Best, S., León, L. Méndez, A., Flores, F., Aguilera, H. 2014. Adopción y Desarrollo de tecnologías en Agricultura de Precisión. Boletín N° 3, Progap-INIA, Chile (CH). 95 pp.
- Best, S., Zamora, I., 2008. Tecnologías aplicables en la Agricultura de Precisión. 1ª ed. Chile (CH). SBN 978-956-7874-90-3. 102 pp.
- Bramley, R. 2009. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application.
- Castellanos, R., Morales, M. 2016. Análisis crítico sobre la conceptualización de la agricultura de precisión. Revista Redalyc. ISSN 1027-2887. Cuba (CU).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2005. Percepción remota “Fundamentos de Teledetección Espacial”. México (MX).
- Dji. ENTERPRISE. 2018. Guía de inicio rápido V1.2P PHANTOM 3 PROFESSIONAL.
- Galindo, G., Espejo, O., Rubiano, J., Cabrera, E., 2014. Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. Colombia (CO). ISBN 978 958 8067 63 3. 52 pp.
- García, E., Flego, F. 2014. Agricultura de Precisión.
- García, I., 2017. Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones. [Tesis Ingeniería. Eléctrica] España (ES): Universidad de Valladolid. 196 pp.
- Heras, A., Sánchez, M., 2017. Diseño de un Vehículo Aéreo no Tripulado multipropósito. [Tesis Ingeniería. Electrónica, industrial y automática] Colombia (CO): Universidad Politécnica de Cartagena. 162 pp.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2014. Manual de agricultura de precisión. Costa Rica (CR). ISBN: 978-92-9248-545-0. 178 pp.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2000. Percepción remota.

- Koundouras, S., Van Leeuwen, C., Seguin, G., Glories, Y. 1999. Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, cépage Saint-Georges, 1997). *J. Int. Sci. Vigne. Vin.* 33. N°4,149-160.
- MAPIR. 2018. Cámara Survey2_Informativo. [en línea] [consultado 31 de julio del 2018] Disponible en el World Wide Web: <<https://www.mapir.camera/products/survey2-camera-ndvi-red-nir>>
- Meneses, C. 2011. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasulva* 238. Vol 62. 8 pp.
- Norton, G., Swinton, S. 2000. *Precision Agriculture: Global Prospects and Environmental Implications.*
- Oficina de Información Científica y Tecnológica para el congreso de la unión (INCYTU). 2018. *Agricultura de precisión.* N° 015. México (MX).
- Ojeda, W., Flores, J., Ontiveros, R. 2016. *Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México (MX). ISBN 978-607-9368-71-5. 427 pp.
- Ojeda, W., González, A., Mauricio, A., Flores, J. 2017. *Aplicación de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola.* Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México (MX).
- Posada, E., Ramírez, H., Espejo, N. 2012. *Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011.* Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF). Colombia (CO). 154 pp.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Shell, J. A., D.W., D. y Harlan, J. C. 1974. *Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III.* Greenbelt, MD, NASA/GSFC: 371.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. y Deering, D.W. 1973. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS.* En: NASA, Goddard Space Flight Center 3d ERTS.
- Sobrino, J. 2000. *Teledetección.* España (ES). ISBN 84-370-4220-8. 460 pp.
- Tucker, C.J., 1979. *Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation.* *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- Wang, X., Xie, H., Guan, H. y Zhou, X. (2007). "Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions." *Journal of Hydrology* 340: 12-14.

CAPÍTULO 4

CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_{c aj}) MEDIANTE DOS METODOLOGÍAS, UTILIZANDO DATOS METEOROLÓGICOS Y VALORES DE NDVI.

4.1 Evapotranspiración del cultivo en condiciones no estándar

Los riegos en el cultivo de la vid deben de ser precisos y adecuados para producir un vino de calidad organoléptica deseable, por lo tanto, es de gran importancia someter a las vides a un estrés hídrico controlado que propicie rendimientos bajos y frutos pequeños, resultando en una cosecha de composición equilibrada y con mejores aptitudes que influyen favorablemente en el potencial enológico del producto (Lissarrague, 2012), caso contrario, si se presenta una extrema deficiencia hídrica o una abundancia de riego se considera como un factor de riesgo que afecta directamente la calidad del fruto, induciendo un crecimiento abundante de la canopia, afectado la concentración de sólidos del fruto y dificultando los tratamientos fitosanitarios (Uriarte *et al.*, 2014).

El agua es un elemento esencial para el desarrollo, crecimiento de las plantas y un correcto metabolismo de los frutos de la vid, situaciones excesivas o decadentes del recurso hídrico, provocan consecuencias negativas en la cantidad y calidad de las uvas; cuando existe un estrés hídrico en el cultivo se refiere a la exigencia energética de la atmósfera a la superficie foliar de las vides, demandando agua de la planta y excediendo la capacidad de extracción de humedad del suelo por la cepa (transpiración) (Lissarrague, 2012).

“La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por transpiración de la superficie foliar de la planta” (FAO, 2006). Cuando la superficie foliar es limitada en el cultivo de la vid, la mayoría del agua que se pierde es a través del proceso de evaporación del suelo, mientras que, cuando el dosel del cultivo se encuentra completo y sano, el proceso de transpiración por la hoja es mayor que la evaporación del suelo (Allen *et al.*, 1998).

El proceso de evaporación se ve afectado por la radiación solar, la temperatura del ambiente, la velocidad del viento y la humedad atmosférica. Además, la tasa de transpiración se ve influenciada por el cultivo, la variedad, el estado de desarrollo, el medio donde se desarrolla y el manejo agronómico que se les da (FAO, 2006).

En zonas de producción bajo condiciones controladas se asemejan condiciones estándar, mientras que en campos que difieren de las condiciones estándar se requiere identificar valores de las condiciones de estrés que se presentan, condiciones como baja fertilidad en suelo, toxicidad, salinidad, sodicidad, anegamiento, plagas, enfermedades y suelos no aptos para la producción, son todas las variables que modifican la evapotranspiración del cultivo, además de minimizar la disponibilidad del agua para la planta, generando una condición de evapotranspiración no estándar bajo condiciones de estrés hídrico.

Existen fuerzas que actúan sobre el agua del suelo y generan que la disponibilidad de extracción del recurso hídrico por parte de las raíces de las plantas sea menor, y que ésta invierta más energía en la extracción; en suelos secos el agua presenta una energía potencial baja, siendo retenida en las partículas del suelo por las fuerzas capilares y la adsorción a la matriz del suelo, siendo menos disponible para el cultivo (FAO, 2006).

Los componentes de la evapotranspiración bajo condiciones de estrés hídrico ($ET_{c aj}$) se conforman por una energía potencial muy baja, dada por las limitaciones de humedad que determina un coeficiente de estrés hídrico del cultivo (K_s); un coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) es aquel que describe la transpiración de la planta y está en función de las distintas etapas fenológicas del cultivo y un coeficiente de evaporación del suelo (K_e) describe la evaporación que ocurre en la superficie de éste, además se incorpora una variable de evapotranspiración de un cultivo referencia (ET_o), esta ocurre en un cultivo hipotético bajo ninguna condición de estrés hídrico (FAO, 2006; Sellés *et al.*, 2000).

$$ET_{c aj} = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o$$

Figura 75. Ecuación de ET_c bajo condiciones de estrés hídrico.

La vid es una planta que se puede desarrollar bajo un periodo de estrés hídrico, ya que presenta una gran capacidad de adaptación, y está ligada a factores anatómicos y morfológicos, tales como la profundidad de las raíces, además de procesos fisiológicos como la capacidad de regulación estomática (Koundouras *et al.*, 1999). La planta de vid presenta la capacidad de controlar la abertura y el cierre estomático en medida en que la disponibilidad hídrica es menor, reduciendo paulatinamente la transpiración (Guardiola y García, 1990), también es una planta con capacidad de regular su consumo de agua (Bessis y Adrián, 2000).

4.2 Variables que constituyen la Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico

Evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o)

La tasa de evaporación de un cultivo de referencia se presenta cuando no existe ninguna restricción de agua para un cultivo hipotético durante todo su ciclo de desarrollo. Generalmente el cultivo hipotético es pasto con características específicas estándar, ésta variable se presenta para el estudio de la evapotranspiración demandada por la atmósfera, siendo independiente del tipo y desarrollo del cultivo, y de las prácticas de manejo de éste.

Identificando la ET del cultivo de referencia se puede relacionar con el K_{cb} y determinar el grado de evapotranspiración del cultivo en estudio (FAO, 2006).

Los parámetros climáticos son los factores que afectan la ET_o , por lo tanto, esta variable debe ser estimada considerando los datos meteorológico-climáticos de la zona en donde se desarrolla el estudio.

Para la determinación de la ET_o se trabajó con la metodología establecida en el manual #56 de la FAO Penman-Monteith, ya que el método considera parámetros climáticos, fisiológicos y aerodinámicos, y logra aproximarse a la realidad (FAO, 2006).

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)}$$

Figura 76. Ecuación de Evapotranspiración del cultivo de referencia.

En donde:

ET_o	Evapotranspiración de referencia (mm dia^{-1})
R_n	Radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
R_a	Radiación extraterrestre (mm dia^{-1})
G	Flujo del calor de suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
T	Temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$)
u_2	Velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})
e_s	Presión de vapor de saturación (kPa)
e_a	Presión de vapor de saturación (kPa)
$e_s - e_a$	Déficit de presión de vapor (kPa)
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
γ	Constante psicométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Para la determinación de la evapotranspiración de referencia en el presente estudio se trabajó con variables meteorológico-climáticas obtenidas de la estación meteorológica del INIFAP San Luis Potosí en las coordenadas Lat: $22^{\circ} 13'39.8''$ N y Long: $100^{\circ} 59'58.3''$ O, ubicada en el municipio de Soledad de Graciano Sánchez.

Se determinó la evapotranspiración para las 6 fechas de vuelo descritas en el capítulo 3.

Coefficiente de estrés hídrico (K_s)

El estrés hídrico de la planta se refleja en la reducción del valor del coeficiente del cultivo, esto se da a partir de multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el valor del coeficiente de estrés hídrico.

La variable que determina el K_s es el agua fácilmente aprovechable (AFA) de la zona radicular del suelo (mm), si el agotamiento de humedad en la zona radicular es mayor que el AFA, K_s se determina con la siguiente ecuación (FAO, 2006):

$$K_s = \frac{ADT - D}{(1 - p)ADT}$$

Figura 77. Ecuación de Coeficiente de estrés hídrico.

En donde:

K_s	Es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo [0 - 1]
D_r	Agotamiento de humedad en la zona radicular [mm]
ADT	Agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm]
p	Fracción de la ADT que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico [-]

Cuando el agotamiento de la zona radicular sea menor que el AFA la K_s será igual a 1.

A pesar del riesgo que muestran las fincas en estudio a presentar salinidad en los suelos (capítulo 2) mostrando valores conocidos de $CE < 1.0 \text{ dS/m}^{-1}$ no están ubicados dentro del umbral de riesgo de la vid (1.5 dS/m^{-1}) (FAO, 2006), por lo tanto, no se consideró la variable de salinidad como un factor que influye en el estrés hídrico y el K_s .

Coefficiente basal del cultivo (K_{cb}) con dos métodos de estimación

El coeficiente del cultivo se conforma por el K_{cb} y el K_e , sin embargo, al determinar un coeficiente de estrés hídrico, éste solo puede alterar el valor del coeficiente basal del cultivo, por lo tanto, las determinaciones de los componentes del K_c se realizarán independientemente.

El K_{cb} describe la transpiración de la planta en un día determinado bajo las condiciones ambientales presentes, lo que permite estimar la evapotranspiración a través del cociente entre la transpiración de la cubierta sin estrés y la evapotranspiración de referencia, y un coeficiente evaporativo del suelo (K_e). El coeficiente del cultivo presenta variaciones con respecto a la etapa de desarrollo y la variedad en estudio (FAO, 2006).

$$K_c = (K_{cb} + K_e)$$

Figura 78. Ecuación de Coeficiente del cultivo.

En donde:

K_{cb}	Coefficiente basal del cultivo
K_e	Coefficiente de la evaporación del agua del suelo

Para la determinación del K_{cb} se trabajan dos metodologías, el cálculo con el componente de transpiración en donde se cuentan con valores de K_{cb} para cada etapa de desarrollo de los cultivos basados en análisis en campo y el modelo basado en el índice de vigorosidad del cultivo, trabajado a partir del NDVI.

$$K_{cb} \text{ calculado} = K_{cb} (t1) + [0.04(u2) - 0.004(HRmin - 45)] (h/r) 0.3$$

Figura 79. Ecuación de Coeficiente basal del cultivo con valores de K_{cb} (FAO, 2006).

$$K_{cb} = 1.44 \text{ NDVI} - 0.1$$

Figura 80. Ecuación de Coeficiente basal del cultivo con base a NDVI (Campos *et al.*, 2010).

Heilman *et al.*, 1982 y Neale *et al.*, 1987, encontraron una relación lineal entre el coeficiente basal del cultivo y el valor de índices de vegetación como el NDVI y el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI). Esta relación se ha analizado para una amplia gama de cultivos y vegetación, basados en trabajos experimentales y teóricos (González *et al.*, 2009; Glenn *et al.*, 2011).

Para el cultivo de la vid Campos *et al.*, en el 2010 propone la ecuación para determinar el K_{cb} con respecto al NDVI con valores que oscilan entre 0.15 y 1.15. La ventaja del cálculo de K_{cb} con base en el NDVI, es que se muestra una mayor exactitud en el valor en de cada pixel que conforma las imágenes en estudio, lo anterior debido a que cada uno de los pixeles de la imagen cuenta con información propia del valor de NDVI que determina el grado de vigorosidad o crecimiento de la vegetación.

El dosel de la imagen transformado a valores de K_{cb} permite describir la evolución del desarrollo del cultivo, con especificaciones de variabilidad espacial y temporal (Calera *et al.*, 2016).

En la presente investigación se determinó el coeficiente basal del cultivo de la vid a partir del K_e propuesto en el manual #56 de la FAO, el coeficiente se trabajó con base a la ecuación propuesta por Campos *et al.*, en el 2010, el K_{cb} se determinó para las seis fechas de vuelo establecidas en el capítulo 3.

Coefficiente de evaporación en el suelo (K_e)

El coeficiente de evaporación del suelo describe el volumen de evaporación que ocurre en la superficie del suelo, si el suelo se presenta húmedo después de una lluvia o riego al momento de determinar el K_e este valor podría ser grande, y éste valor se reducirá a medida que la superficie del suelo se seca y se igualará a cero cuando no haya presencia de agua remanente en el suelo para su evaporación (FAO, 2006).

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) < f_{ew} K_{cmax}$$

Figura 81. Ecuación de Coeficiente de evaporación del suelo.

En donde:

K_e	Coeficiente de la evaporación en el suelo
K_{cb}	Coeficiente basal del cultivo
$K_{c\ max}$	Valor máximo de K_c después del riego o lluvia
K_r	Coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente de la lámina acumulada de agua agotada (evaporada) de la capa superficial del suelo,
f_{ew}	Fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto y humedecido, es decir la fracción de la superficie del suelo a partir de la cual ocurre la mayor parte de la evaporación

4.3 Interpretación de mapas esquemáticos de la Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico.

Evapotranspiración estimada con el K_{cb} a partir del NDVI

La determinación de la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés fue calculada con la metodología de Penman-Monteith propuesta en el manual #56 de la FAO, integrando los variables de la ecuación: evapotranspiración de referencia, coeficiente de estrés hídrico, coeficiente de evaporación del suelo y coeficiente basal del cultivo.

Las Figuras 82 – 87 muestran el grado de evapotranspiración del cultivo de la vid integrando el K_{cb} calculado a partir del NDVI obtenido de las imágenes trabajadas en el capítulo 3; el coeficiente basal del cultivo fue estimado a partir de la ecuación descrita en la Figura 80 propuesta por Campos *et al.*, en el 2010.

Seguidamente que se determinó el NDVI se trabajó en la extensión ArcMap 10.2 de ArcGIS, y se determinó el K_{cb} con la función *Raster Calculator*, una vez obtenido el raster con valores de K_{cb} para cada uno de los pixeles, se integró la ecuación de la $ET_{c\ aj}$ (Figura 75) trabajando de igual manera en la extensión *Raster Calculator*. Una vez concluido el proceso se obtienen valores de $ET_{c\ aj}$ en mm y como último paso se prosigue a la generación de mapas esquemáticos para la apropiada interpretación.

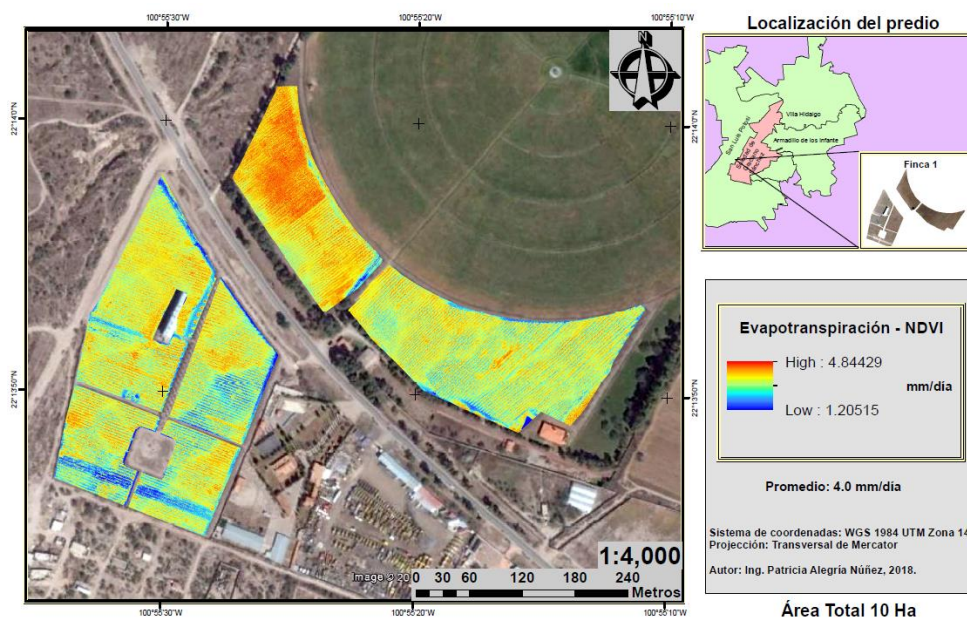


Figura 82. Determinación de $ET_{c\ aj}$ basado en el cálculo de K_{cb} respecto al NDVI. A 28 días del mes de septiembre del 2017.

La Figura 82 muestra la variabilidad del grado de evapotranspiración de la Finca 1 para el día 28 de septiembre del 2017, identificando zonas con una $ET_{c\ aj}$ máxima de 4.84 mm y una $ET_{c\ aj}$ mínima de 1.2 mm, toda la zona en estudio muestra un grado de evapotranspiración lo que se atribuye a la lámina de riego presente en la zona de estudio y a periodos de precipitación durante días previos a la ejecución del vuelo.

Al presentarse un grado de humedad en el suelo, una temperatura ambiental de 25°C y un cielo soleado, el grado de evapotranspiración del cultivo se encuentra dentro de un rango ideal para un cultivo de vid bajo riego y sin presencia de estrés hídrico.

El grado de evapotranspiración presente en la Finca 2 para el 15 de noviembre del 2017 es de 2.84 mm el cual corresponde a los árboles presentes en la zona de estudio, mientras que el valor de $ET_{c\ aj}$ de la vid oscila entre 1 y 2.5 mm. El bajo grado de evapotranspiración de la vid se debe a que la planta inició el periodo de agostamiento y un porcentaje de su canopia se presentaba en periodo de senescencia, además, los frentes fríos que se presentaron en el mes de noviembre aceleraron el periodo de agostamiento e indujeron el reposo invernal de la plantación. Los valores por debajo de 0 se atribuyen a la zona de suelo desnudo y sin rastro de humedad en el suelo.

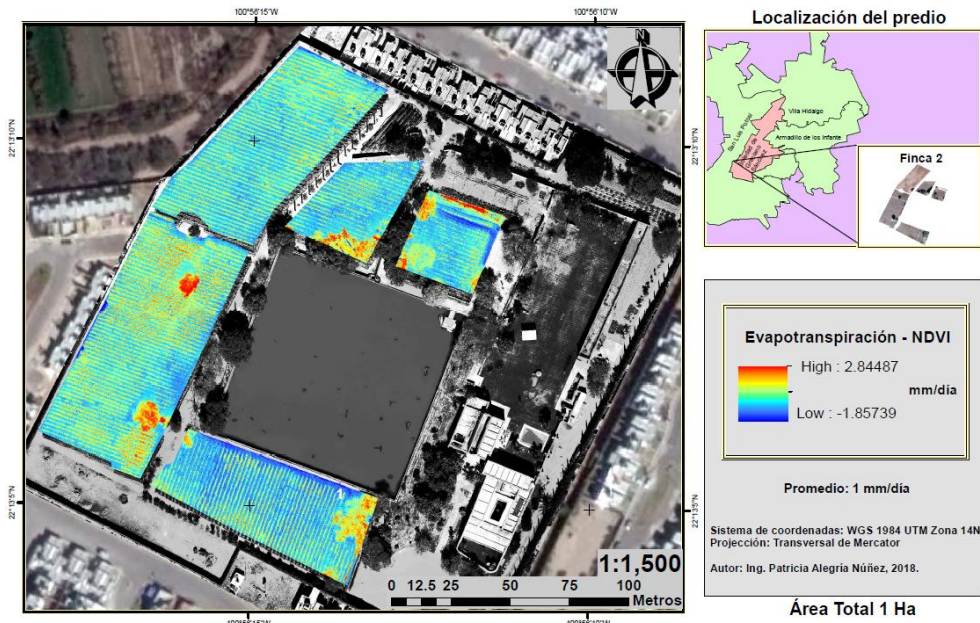


Figura 83. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de K_{cb} respecto al NDVI. A 15 días del mes de noviembre del 2017.

Los frentes fríos de los meses de noviembre y diciembre indujeron el periodo de reposo invernal en las dos fincas de estudio, sin embargo, la Finca 2 se vio mayormente afectada, puesto que el grado de secado de la biomasa área de las plantas se presentó en un 50% para el 15 de noviembre, mientras que en la Finca 1 el grado de senescencia en un 85% se presentó para la fecha del 20 de diciembre del 2017.

La Figura 84 muestra la variabilidad de la evapotranspiración en la Finca 1 para el día 20 de diciembre del 2017 en donde se observa un valor de 2.54 mm de $ET_{c_{aj}}$ para no más del 15% de la zona productiva, el resto de la plantación presenta valores de evapotranspiración menores a 1.5 mm. Para finales del mes de diciembre, después de haber concluido 19 frentes fríos a lo largo del estado, ambas fincas en estudio presentaron en su totalidad la finalización del periodo de agostamiento y el inicio del reposo invernal.

La Figura 85 muestra que la totalidad de la Finca 2 no presenta ningún grado de evapotranspiración, ya que se presenta el periodo de reposo invernal y no hay presencia de biomasa activa a lo largo de toda la zona de estudio.

Seguidamente del periodo de poda en el mes de marzo, comienza el periodo de brotación de las nuevas ramas que compondrán la canopia de la vid; conforme crecen y se desarrollan las nuevas ramas, el grado de verdor se va incrementando y con esto el grado de evapotranspiración.

La Figura 86 presenta la variación de la evapotranspiración del día 28 de mayo del 2018, en donde la planta continuaba en el proceso de brotación, además todas las variedades presentaban floración y en algunas variedades como la Merlot y Syrah presentaban el fruto formado.

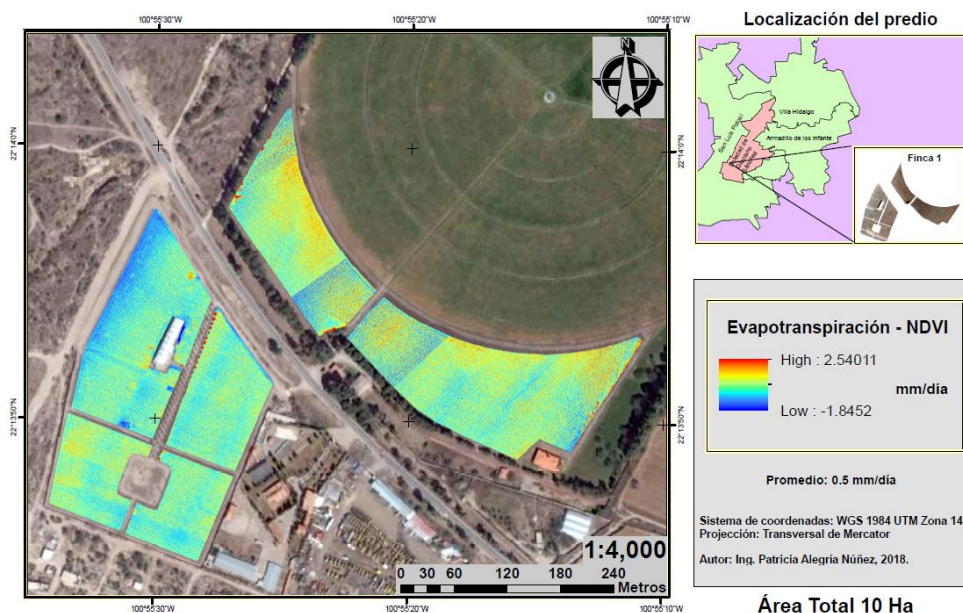


Figura 84. Determinación de $ET_{c\text{aj}}$ basado en el cálculo de K_{cb} respecto al NDVI. A 20 días del mes de diciembre del 2017.

El grado de evapotranspiración de 2.78 mm (Figura 86) corresponde a árboles presentes en la zona de estudio, mientras que el valor promedio de $ET_{c\text{aj}}$ para la planta de vid fue de 1.8 mm. Las zonas que presentan una tonalidad azul muestran condiciones de suelo expuesto totalmente desnudo sin ningún grado de evapotranspiración.

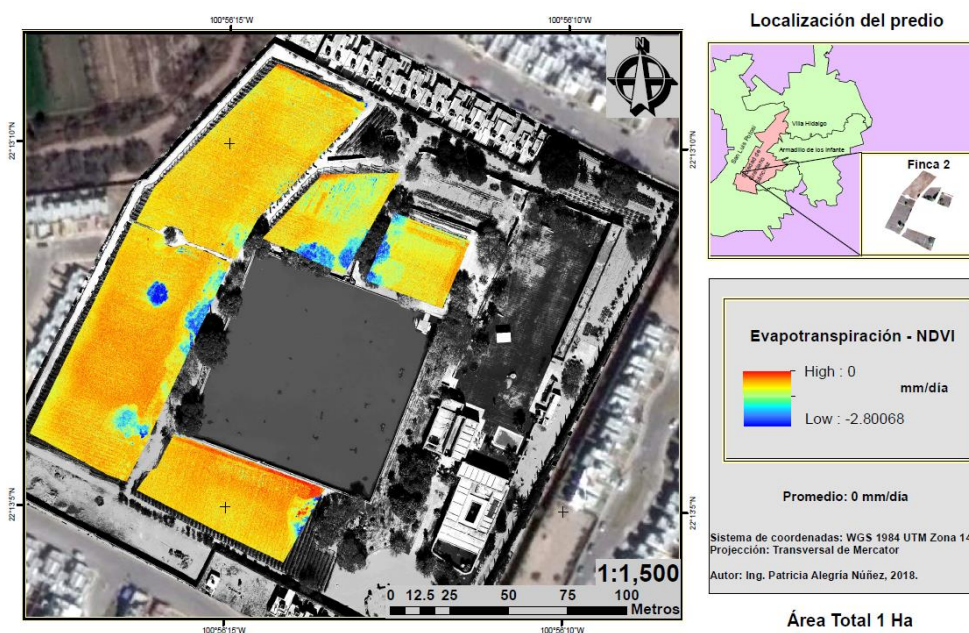


Figura 85. Determinación de $ET_{c\text{aj}}$ basado en el cálculo de K_{cb} respecto al NDVI. A 31 días del mes de enero del 2018.

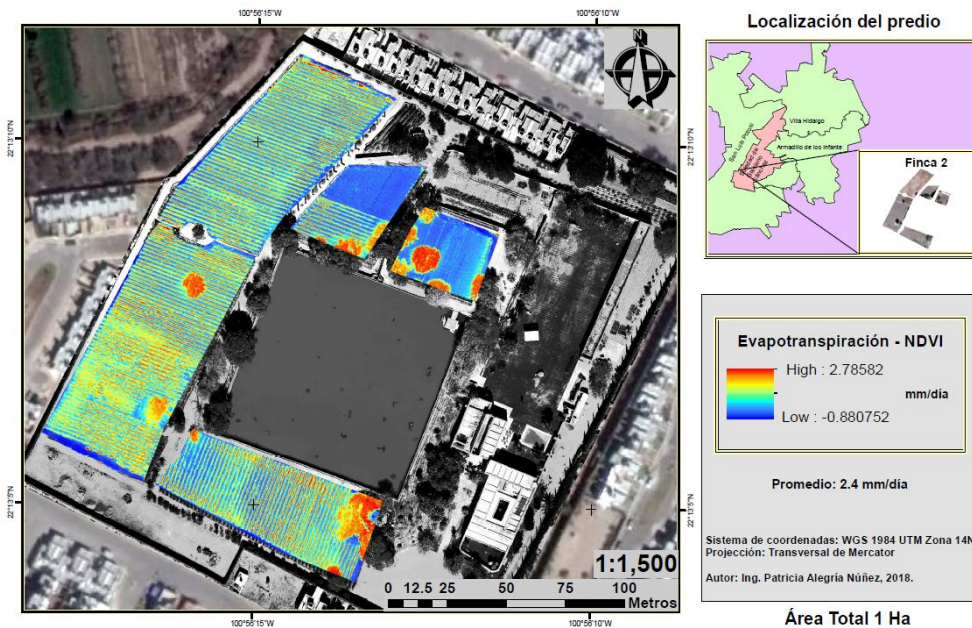


Figura 86. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de K_{cb} respecto al NDVI. A 28 días del mes de mayo del 2018.

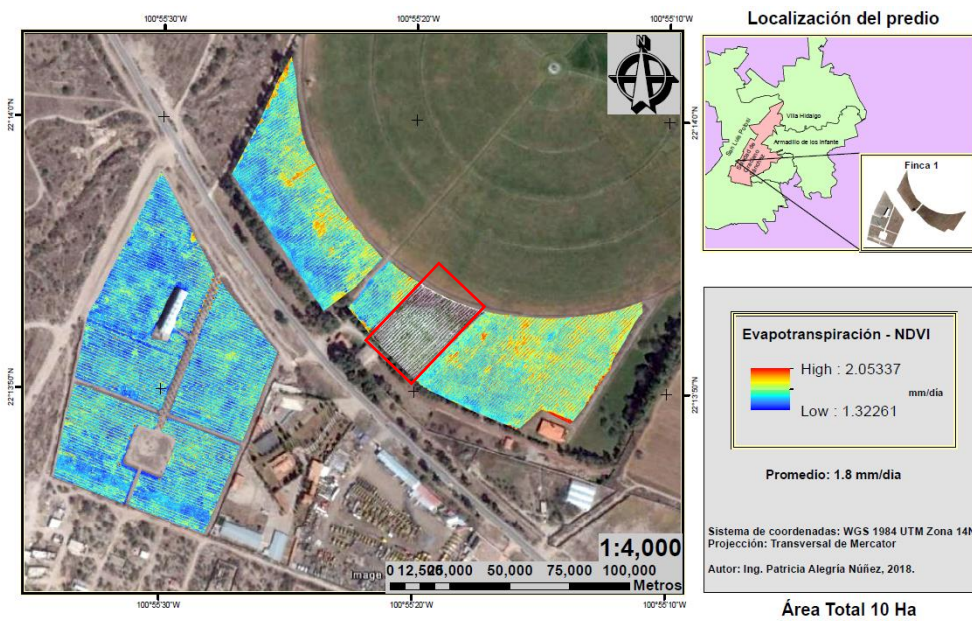


Figura 87. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de K_{cb} respecto al NDVI. A 21 días del mes de junio del 2018.

El grado de evapotranspiración para el día 21 de junio del 2018 en la Finca 1 no vario significativamente con respecto a la evaluación realizada el día 28 de mayo del mismo año. Se esperaba que el grado de $ET_{c_{aj}}$ para el 21 de junio estuviera cerca de 5 mm, lo cual mostraría un grado de vigorosidad alto y sin presencia de estrés hídrico, sin embargo, la condición que se muestra en la Figura 87 es un alto grado de estrés hídrico a lo largo de la zona productiva.

La zona Oeste de la finca presenta un mayor grado de deficiencia hídrica con valores de $ET_{c_{aj}}$ no mayor a 1.6 mm, mientras que la zona Este muestra un mejor grado de evapotranspiración alcanzando 2.05 mm. Al presentarse una deficiencia hídrica en el suelo, la planta reacciona al estrés e induce un cierre estomático, reduciendo con esto el grado de transpiración, comportamiento que se observa infiere para la fecha de estudio del 21 de junio del 2018.

El grado de estrés hídrico de la zona en estudio se atribuye a la ausencia de riegos durante un periodo prolongado, lo que contribuye a incentivar la concentración de azúcares y metabolitos secundarios lo que beneficia la condición organoléptica de los vinos producidos.

Evapotranspiración estimada con el K_{cb} calculado con metodología propuesta por la FAO 2006.

El segundo método utilizado para la determinación de la evapotranspiración de la zona de estudio fue el propuesto por la FAO en el 2006, en donde se integran las cuatro variables que determinan el grado de $ET_{c_{aj}}$ (evapotranspiración de referencia, coeficiente de estrés hídrico, coeficiente de evaporación del suelo y coeficiente basal del cultivo), pero en ésta metodología la determinación de la variable de coeficiente basal del cultivo se trabajó con la ecuación descrita en la Figura 79 propuesta en el manual #56 de la FAO, en donde se consideran variables como altura de planta, índice de área foliar, humedad relativa y velocidad del viento.

Para la determinación de la evapotranspiración se realizaron mediciones en campo de la altura de la planta y se estimaron valores del Índice de área foliar (IAF) para cada fecha de estudio, seguidamente se trabajó la información en un archivo de Excel en donde se tabularon los datos requeridos y se desarrollaron las ecuaciones de interés descritas en el subtítulo 4.2, una vez obtenidos los valores de evapotranspiración se trabajó en la extensión ArcMap 10.2 de ArcGIS, y aquí se generó un layer de puntos georreferenciados con los valores de $ET_{c_{aj}}$ y se prosiguió a realizar una interpolación con el método Kriging, una vez obtenida la información se generaron los mapas esquemáticos para cada una de las fechas en estudio

Las figuras 88 - 93 muestran el grado de evapotranspiración en la zona de estudio para las mismas fechas analizadas en el apartado anterior (K_{cb} a partir del NDVI), la $ET_{c_{aj}}$ estimada a partir del K_{cb} -calculado muestra un comportamiento similar a la $ET_{c_{aj}}$ calculada a partir del NDVI, sin embargo, no se presenta el mismo grado de evapotranspiración.

La $ET_{c_{aj}}$ estimada a partir del K_{cb} -calculado, se presenta en menor medida y con un grado de generalización a lo largo de la zona de estudio, por ejemplo, en la Figura 88 se muestra un grado de evapotranspiración de 2.09 a 2.13 mm a lo largo del área productiva para el día 28 de septiembre del 2017, además de que se generaliza la información en las zonas con vegetación y suelo desnudo. Para la estimación de la evapotranspiración se tomó en cuenta la altura de la planta clasificada por variedad, las alturas no variaron significativamente, así como tampoco lo fue el IAF, por lo tanto, la $ET_{c_{aj}}$ no presentó mayor cambio a lo largo de la zona de estudio.

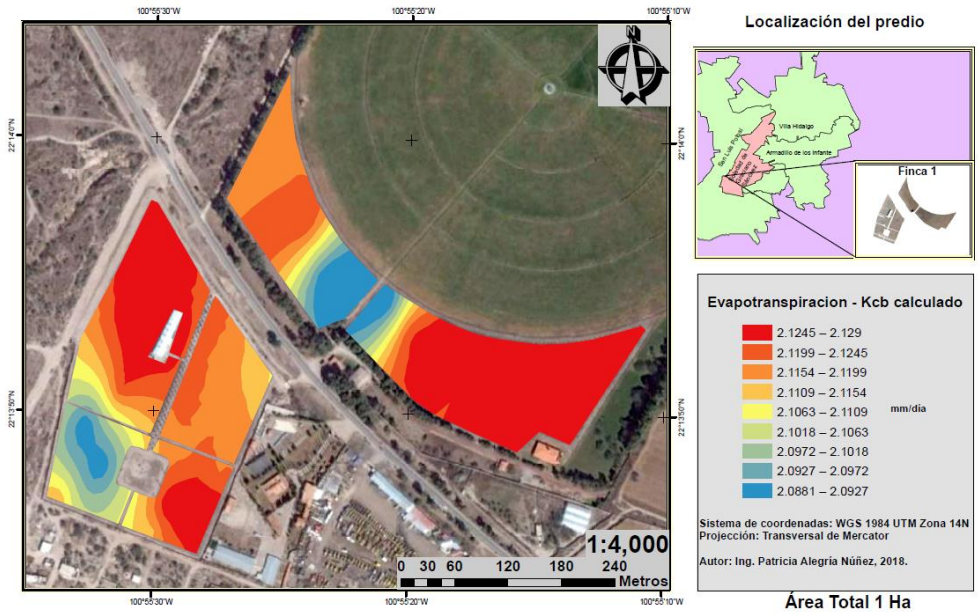


Figura 88. Determinación de $ET_{c\text{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 28 días del mes de septiembre del 2017.

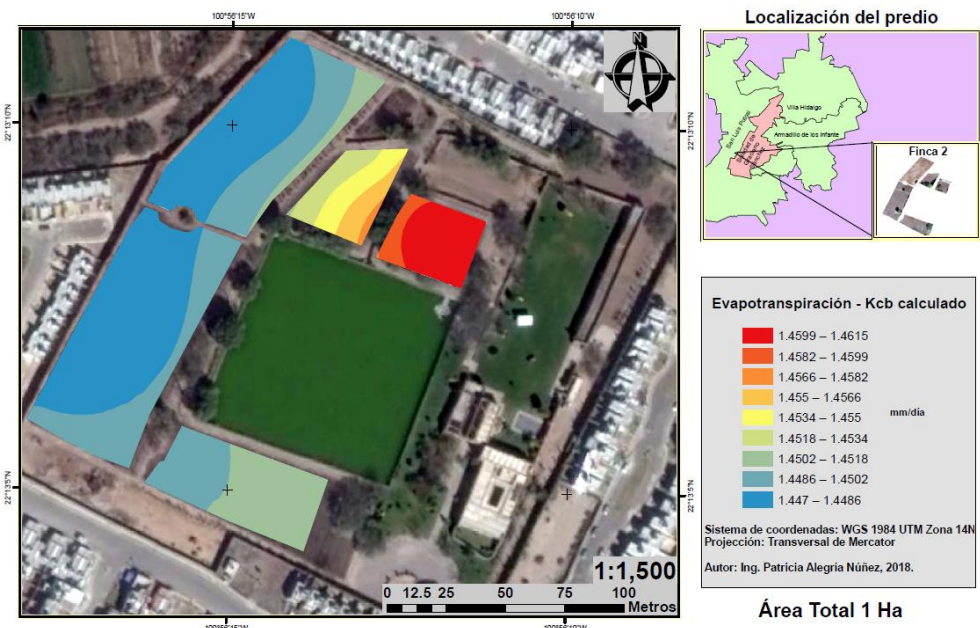


Figura 89. Determinación de $ET_{c\text{aj}}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 15 días del mes de noviembre del 2017.

La generalización de la evapotranspiración es más notoria en las figuras 90 - 91, ya que durante el periodo de agostamiento y reposo invernal las plantas de vid mostraron la misma condición en el análisis, al no presentar biomasa aérea, disminuyendo el grado de evapotranspiración a 0.12 mm y 0 mm, respectivamente.

En las Figuras 92 – 93 se muestra la evapotranspiración para los días 28 de mayo del 2018 y 21 de junio del 2018, respectivamente, en éstas fecha la planta presentaba brotes nuevos, flor y algunas variedades mostraban el cuajado del fruto, por la tanto la planta demandaba recurso hídrico y se presentaba a su vez un grado de evapotranspiración, sin embargo, las plantas muestreadas y clasificadas por variedad no mostraron diferencia significativa en su altura, por lo que no existió variabilidad en la $ET_{c_{aj}}$ a lo largo de la zona de estudio.

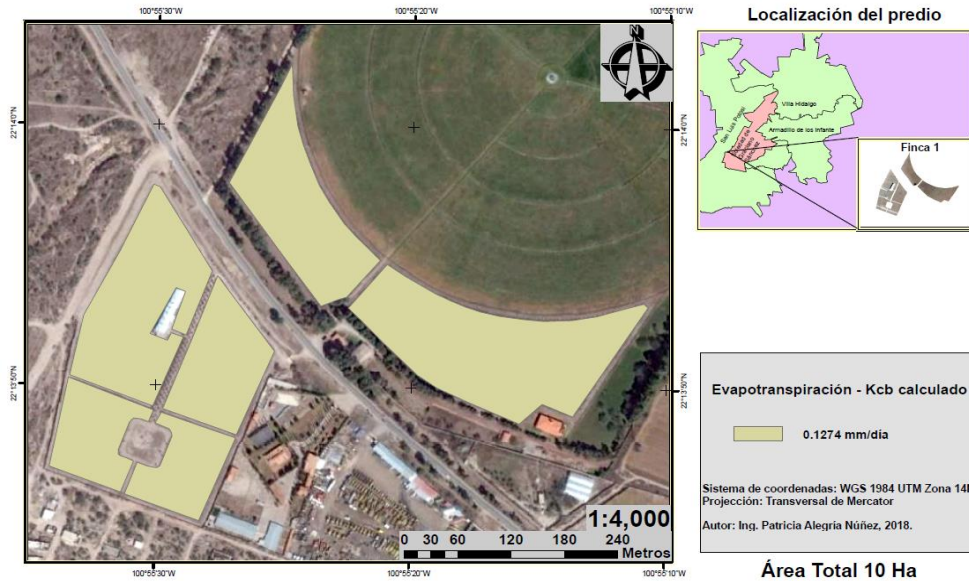


Figura 90. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de K_{cb} -calculado con el uso del manual #56 de la FAO Finca 1. A 20 días del mes de diciembre del 2017.

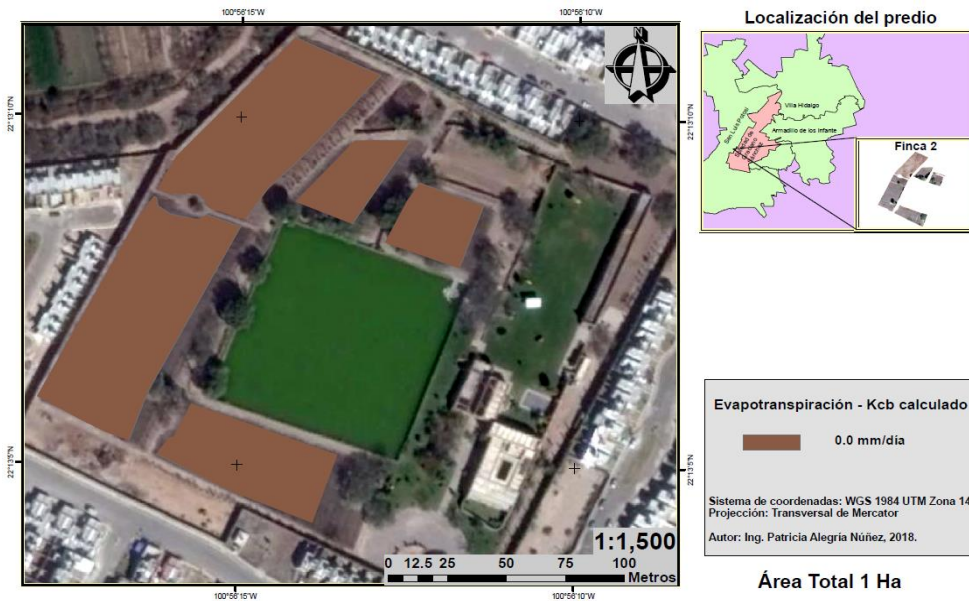


Figura 91. Determinación de $ET_{c_{aj}}$ basado en el cálculo de K_{cb} -calculado con el uso del manual #56 de la FAO. A 31 días del mes de enero del 2018.

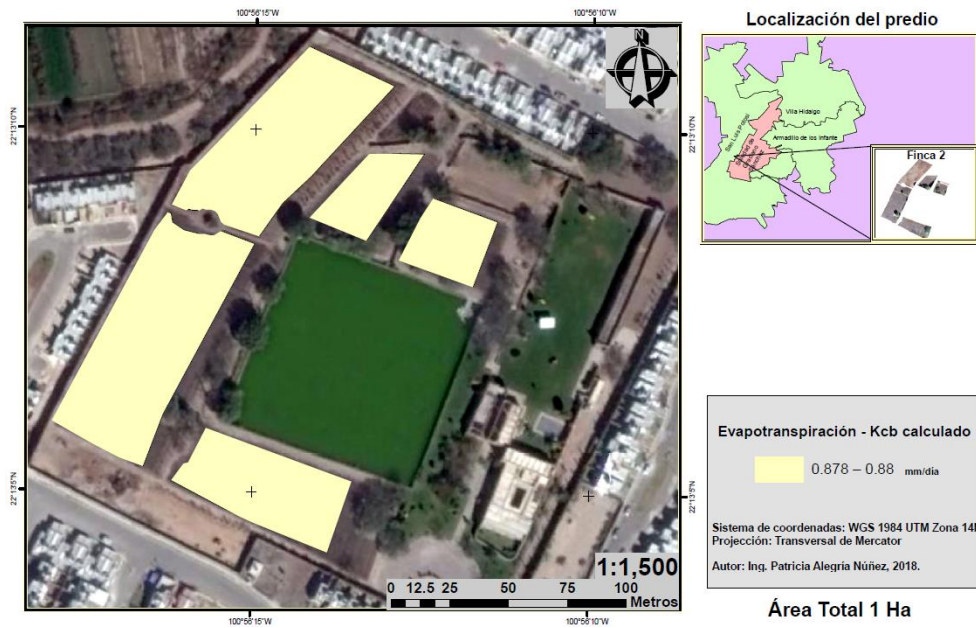


Figura 92. Determinación de $ET_{c\ aj}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 28 días del mes de mayo del 2018.

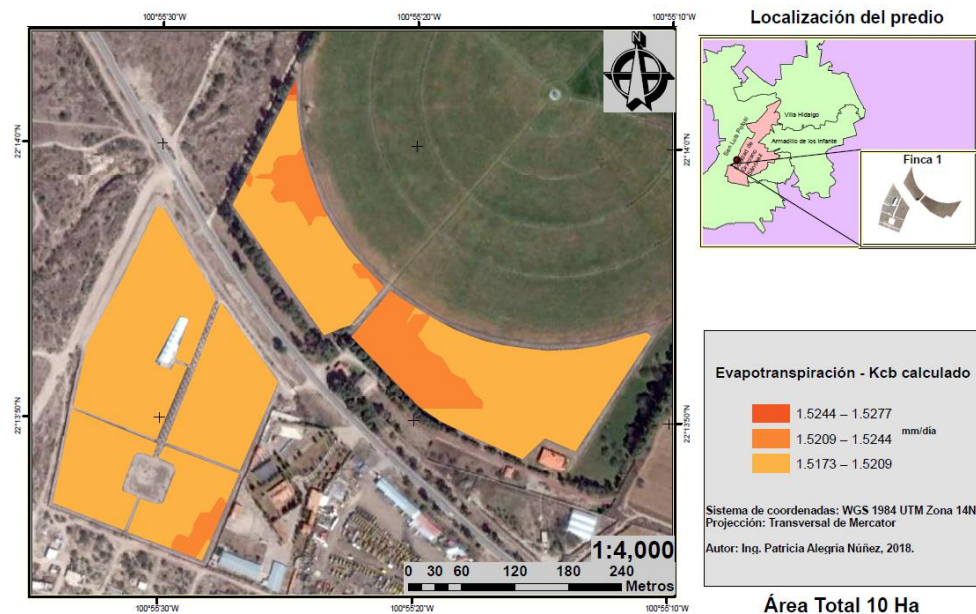


Figura 93. Determinación de $ET_{c\ aj}$ basado en el cálculo de $K_{cb\text{-calculado}}$ con el uso del manual #56 de la FAO. A 21 días del mes de junio del 2018.

4.4 Estadísticas de evapotranspiración del cultivo

Los valores de evapotranspiración presentan una asociación a las condiciones ambientales, días soleados, secos y calientes presentan valores elevados de evapotranspiración, ya que puede exceder la absorción de agua por las raíces causando déficit hídrico, mientras que, en días nublados, frescos, húmedos y con vientos cortos se presentan valores bajos de evapotranspiración (Williams y Matthews 1990; Myburgh, 1996; Moyer, 2015).

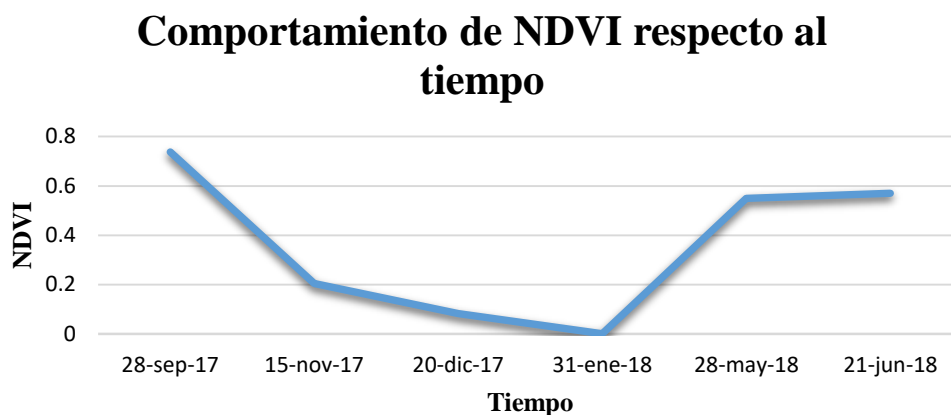


Figura 94. Evolución del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado durante el ciclo productivo de la vid 2017-2018.

El uso de series temporales permite la descripción de la evolución del coeficiente basal del cultivo y del índice de vegetación a lo largo del ciclo de crecimiento, además de permitir estimar la necesidad hídrica del cultivo espacialmente distribuida.

Como se observa en la figura 94, la vid alcanza su máximo desarrollo dentro del ciclo productivo en el mes de junio del 2018 logrando un valor de NDVI de 0.58. Así mismo alcanza un valor cercano a 0.80 en el periodo de poscosecha en el mes de septiembre del 2017, en esta última fecha se realizaron riegos de recuperación y hubo presencia de lluvias, lo que incrementaron la vigorosidad del cultivo, mientras que los valores cercanos a cero se presentan en los periodos de agostamiento e inicios del periodo invernal, y los valores de cero se muestran durante el reposo invernal durante los meses de enero y febrero.

La figura 95 muestra la relación entre el valor del NDVI y el grado de $ET_{c\ aj}$ a partir del NDVI, se presenta una relación perfecta directamente proporcional ($R^2 = 0.9378$) entre las variables de interés. Un mayor grado de evapotranspiración muestra un mejor grado de sanidad y sin presencia de estrés hídrico. Valores altos de NDVI refieren a una evapotranspiración adecuada en la zona de estudio.

Relación del NDVI respecto a la ET c aj-NDVI

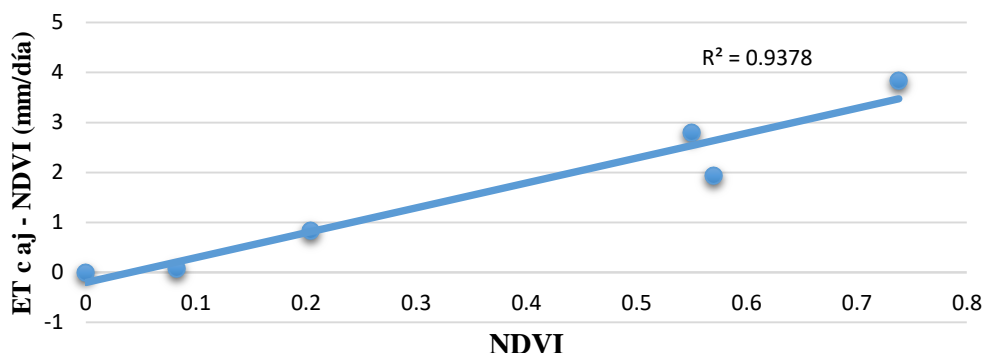


Figura 95. Relación entre el valor de NDVI y el grado de ET c aj calculado a partir del NDVI durante el ciclo productivo de la vid 2017 – 2018.

El coeficiente determinante que muestra la relación lineal entre el grado de evapotranspiración a partir del K_{cb}-calculado con base a el manual #56 de la FAO y el K_{cb} estimado a partir del valor de NDVI durante el ciclo productivo de la vid 2017-2018 es de 0.8216.

Relación de la ET c aj- Kcb-calculado respecto a ET c aj-NDVI

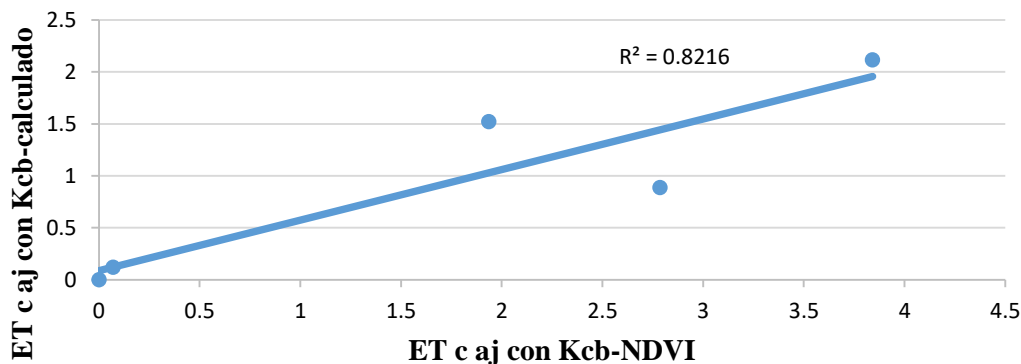


Figura 96. Relación entre el grado de evapotranspiración a partir del K_{cb}-calculado con base a el manual #56 de la FAO y el K_{cb} estimado a partir del valor de NDVI durante el ciclo productivo de la vid 2017-2018.

Cuadro 25. Determinación de la correlación ente en grado de evapotranspiración con los métodos K_{cb}-calculado con base al manual #56 de la FAO y el K_{cb} calculado a partir del valor de NDVI, InfoStat.

	ET c aj – NDVI	ET c aj – Kcb calculado
ET c aj – NDVI	1.0	p = 0.06
ET c aj – Kcb calculado	R = 0.80	1.0

El grado de correlación entre la evapotranspiración a partir del K_{cb} -calculado con base a el manual #56 de la FAO y el K_{cb} estimado a partir del valor de NDVI es de 0.80 (Cuadro 25), catalogada como una correlación alta, por lo que se determina que ambas metodologías utilizadas son aptas para la determinación de la $ET_{c\ aj}$, sin embargo, la Figura 98 muestra la distribución de la evapotranspiración a lo largo del ciclo 2017-2018, en donde se observa que ambas metodologías utilizadas presentan un comportamiento similar al propuesto por Uriarte *et al.*, 2014 y Zermeño *et al.*, 2017 (Figura 97), no obstante, le $ET_{c\ aj}$ calculada a partir del NDVI muestra un mejor ajuste al grado de evapotranspiración que se muestra en la Figura 97.

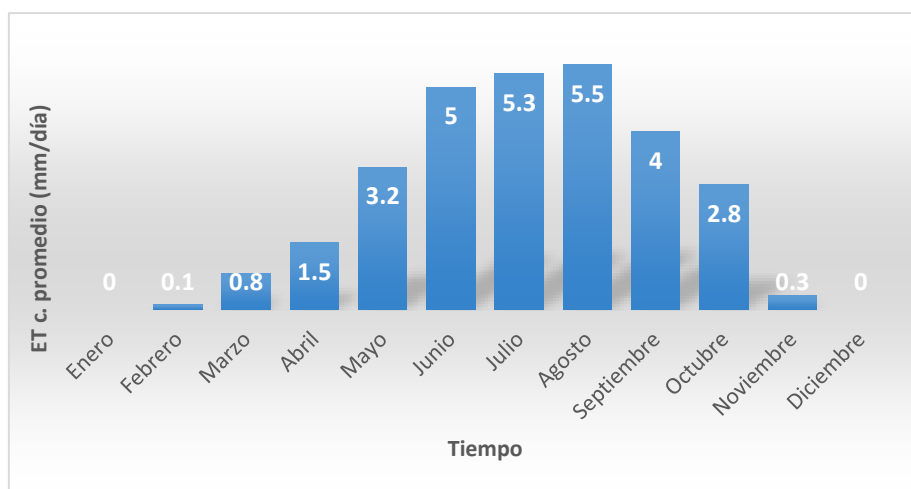


Figura 97. Evolución mensual de la Evapotranspiración diaria en el cultivo de la vid (Uriarte *et al.*, 2014; Zermeño *et al.*, 2017).

El volumen de agua que una planta de vid pierde durante la transpiración varía con respecto al desarrollo del dosel y variedad en estudio. La Figura 98 muestra el comportamiento de la evapotranspiración calculada por dos metodologías, en donde se observa un grado de $ET_{c\ aj}$ mayor en el mes de septiembre, mes de periodo de poscosecha donde se presentaron riegos de recuperación; durante los meses de diciembre a enero se presentan los valores más bajos de $ET_{c\ aj}$, ya que en estos meses se presentó el periodo de agostamiento y el reposo invernal.

Para el mes de mayo se alcanzaron 2.7 mm de evapotranspiración por día al calcularse bajo el método de $ET_{c\ aj}$ - NDVI, acercándose al valor propuesto por Uriarte *et al.*, 2014 y Zermeño *et al.*, 2017 (3.2 mm), el grado apropiado de evapotranspiración se debe a los riegos aplicados en la zona de estudio a pesar que las temperaturas rebasaron los 34°C y éstas inducen un mayor grado de evapotranspiración, además que una disminución en la densidad de plantación reduce el déficit hídrico, dado que existe menos competencia entre el sistema radicular de las plantas y logran éstas lograr extraer más agua del suelo (Champagnol, 1979).

Comportamiento de la Evapotranspiración del cultivo de la vid

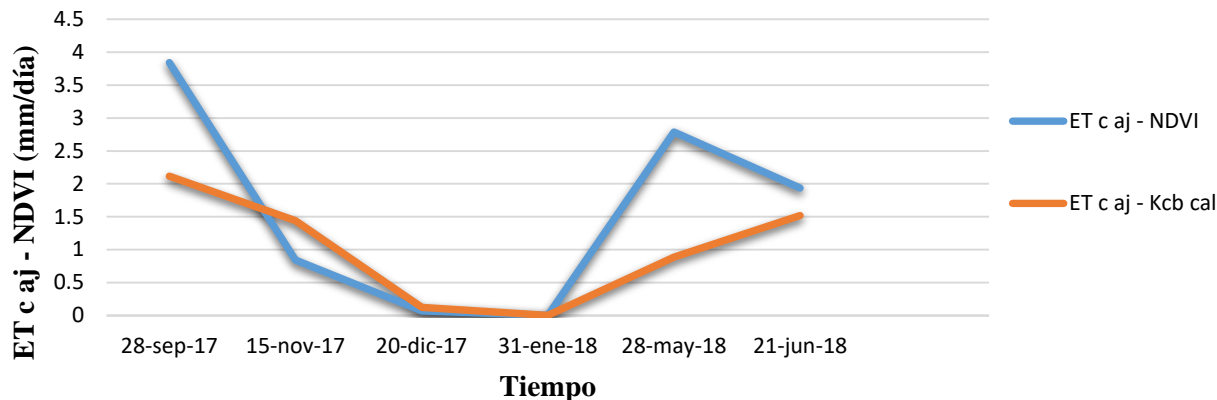


Figura 98. Evolución del grado de Evapotranspiración del cultivo bajo condiciones de estrés hídrico diaria (FAO, Penman-Monteith) durante el ciclo productivo de la vid 2017-2018 utilizando dos métodos de determinación (ET c aj-NDVI y ET c aj- Kcb calculado)

A pesar que el modelo $ET_{c\text{ aj-NDVI}}$ muestra un mejor ajuste a la evolución de la evapotranspiración propuesto por Uriarte *et al.*, 2014 y Zermeño *et al.*, 2017 se presenta un decaimiento de la evapotranspiración en el mes de junio (1.9 mm) y un NDVI menor a 0.58, lo anterior se atribuye a que la planta presentaba un grado de estrés hídrico por la ausencia de riego por un periodo de tiempo prolongado, ya que una vez que la humedad en el suelo está por debajo de cierto umbral, la planta no es capaz de absorber el agua del suelo y ésta comenzará a entrar en un estrés hídrico, aunado a esto, la presencia de temperaturas por encima de 25°C y vientos secos inducen el cierre estomático de las plantas y se disminuye el ritmo de la transpiración con el objetivo de resguardar y aprovechar el recurso hídrico. La ausencia de riegos en la zona de estudio se realizó con el objetivo de lograr un control en el exceso de vegetación el cual induce directamente en la producción y calidad del mosto (Novello *et al.*, 1992).

4.5 Conclusiones del capítulo 4

- ❖ El modelo de Penman-Monteith presentado en el manual #56 de la FAO con el uso del K_{cb} -calculado para el cultivo de la vid, permitió estimar el grado de evapotranspiración en la zona de estudio, sin embargo, el modelo que presentó mayor grado de ajuste al propuesto por Uriarte *et al.*, 2014 y Zermeño *et al.*, 2017 es donde se utilizó el K_{cb} estimado a partir del NDVI.
- ❖ La determinación de la $ET_{c\ aj}$ del cultivo de la vid puede trabajarse a partir de los dos modelos empleados en el presente estudio, la correlación que se muestra entre ambos es de 0.8 con un valor de p de 0.05; sin embargo, el modelo de evapotranspiración a partir K_{cb} estimado con el NDVI, presenta un mayor ajuste a lo largo del tiempo.
- ❖ El análisis de la evolución del Índice Diferencial de Vegetación Normalizado a lo largo del tiempo, permite visualizar el comportamiento del cultivo con respecto al ciclo de crecimiento, además de identificar el grado de vigorosidad y estrés hídrico que muestra la planta al momento de captar la información, ya sea con el uso de sensores desde un VANT o desde un satélite.
- ❖ Los resultados obtenidos de la relación entre $ET_{c\ aj}$ calculada a partir del K_{cb} basado en el NDVI, muestran un valor de R^2 de 0.9378 con relación lineal, lo que determina que, entre mayor sea el grado de evapotranspiración mayor será el NDVI. A medida que el NDVI se acerca a +1 se presenta un mayor grado de vigorosidad, propiciando una evapotranspiración favorable y sin estrés hídrico.
- ❖ El coeficiente basal del cultivo estimado a partir del NDVI, permite calcular directamente el grado de evapotranspiración con el modelo de Penman-Monteith presentado en el manual #56 de la FAO. La estimación del K_{cb} desde imágenes adquiridas desde un sensor en un VANT se presentan como una herramienta operativa y precisa que contribuye a la agricultura de precisión.
- ❖ Los meses de estudio con menor grado de NDVI, K_{cb} y $ET_{c\ aj}$, corresponden a los periodos de agostamiento y reposo invernal.
- ❖ El mes que presenta un mayor grado de estrés hídrico en la etapa productiva de la vid es el mes de junio del 2018 con una evapotranspiración de 1.9 mm/día, lo anterior se atribuye a la ausencia de riegos por un periodo de tiempo prolongado, lo que determina que la disminución de la evapotranspiración está relacionada directamente con el estado hídrico

4.6 Abreviaciones del capítulo 4

AFA	agua fácilmente aprovechable
CE	Conductividad Eléctrica
ET c aj	evapotranspiración bajo condiciones de estrés hídrico
ETo	Evapotranspiración del cultivo de referencia
IAF	Índice de Área Foliar
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
Kcb	coeficiente basal del cultivo
Kcb-calculado	coeficiente basal del cultivo determinado a partir de tablas propuestas en el manual #56 de la FAO.
Kcb-NDVI	coeficiente basal del cultivo determinado a partir del NDVI
Ke	coeficiente de evaporación del suelo
Ks	coeficiente de estrés hídrico del cultivo
NDVI	Índice de Vegetación Diferencial Normalizado
SAVI	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo

4.7 Bibliografía del capítulo 4

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma (IT). 280 pp.
- Bessis, R., Adrián. M. 2000. Alimentation hydrique de la vigne: un facteur de l'expression du terroir. Progrés Agricole et Viticole. Vol. 117. N° 15-16, 345-350. Francia (FR). 11 pp.
- Calera, A., Campos, I., Garrido, J., 2016. Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. España (ES). 20 pp.
- Campos, I., Calera, A., Balbontín, C., Torres, E., González, J., Neale C. 2010. Basal crop coefficient from remote sensing assessment in rain-fed grapes in southeast Spain. España (ES). Publi. 352,2012,397-400. 20 pp.
- FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos #56 Modificado. Roma (IT). ISBN 92-5-304219-2. 322 pp.
- Glenn, E., Neale, C., Hunsaker, D., Nagler, P. 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. Hydrological Processes, 25: 4050-4062. Estados Unidos (EU). 13 pp.
- González, M., Neale, C., Mateos, L., Kustas, W., Prueger, J., Anderso, M., Li, F.2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. Agricultural and Forest Meteorology, 149; 1843-1853 11 pp.
- Guardiola, J., García, A. 1990. Fisiología vegetal I: Nutrición y Transporte. España (ES). ISBN: 8477380953. 440 pp.
- Heilman, J., Heilman, W., Moore, D. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. Agronomy Journal, 74: 967-971. 5 pp.
- Koundouras, S., Van Leeuwen, C., Seguin G., Glories, Y. 1999. Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, cépage Saint-Georges, 1997) J. Int. Sci. Vigne. Vin. 33. N°4,149-160. Francia (FR). 12 pp.
- Lissarrague, J., 2012. Consecuencias del déficit hídrico en viñedos de zonas cálidas y estrategias de riego en función de los objetivos de la producción de uva. III Jornadas de riego y nutrición: vid y olivar. España (ES). 7 pp.
- Moyer, M., 2015. Conceptos básicos de riego para los viñedos del Este de Washington. Washington State University. 14 pp.

- Myburgh, P. 1996. Response of *Vitis vinifera* L. cv. Barlinka/Ramsey to soil water depletion levels with particular reference to trunk growth parameters. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* Vol. 17. N° 1, 3-14. 12 pp.
- Neale, C. 1987. Development of Reflectance-based crop coefficients for corn. Ph. Dissertation. Colorado State University. Fort Collins. Estados Unidos (EU). 8 pp.
- Novello, V., Schubert, A., Antonietto, M., Bosch A. 1992. Water relations of grapevine cv. Córtese with different training systems. *Vitis* 31,65-75. Roma (IT). 11 pp.
- Sellés, G., Ferreira, E., Sellés, I. 2000. Uva de mesa en Chile. Editorial Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Chile (CH). 338 pp.
- Uriarte, D., Manca, A., Gómez, O., Prieto, M. 2014. Manual práctico de riego de vid para vinificación. CICYTEX. Departamento de Hortofruticultura, Grupo de riego y nutrición. España (ES). Dep. Legal: BA-235/2014. 16 pp.
- Williams, L., Matthews, M., 1990. Grapevine. En: B.A. Stewart y D.R. Nielsen (eds.). *Irrigation of agricultural crops. Agronomy Monograph N° 30.* 1019-1055 Estados Unidos (EU). 11 pp.
- Zermeño, A., Melendres, A., Fuerte, A., Mungulia, J., Ibarra, L. 2017. Evapotranspiration rate of vineyard and its relation to the reference of the FAO Penman-Monteith. *Agrociencia*, vol. 51, num. 1. México (MX). ISSN: 1405-3195. 13 pp.

CAPÍTULO 5

DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DIFERENCIAL DE AGUA NORMALIZADO (NDWI) CON EL USO DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES.

5.1 Uso de imágenes satelitales multiespectrales para la determinación del Índice Diferencial de Agua Normalizado

El grado de vigorosidad de una planta está relacionado directamente con el estado hídrico del suelo en donde se desarrolla. La necesidad hídrica de una plantación para conservar un alto grado de vigorosidad y sanidad, está en función de la especie, variedad y condiciones ambientales que se presenten.

En el cultivo de la vid la demanda hídrica promedio varía de 170 mm a 600 mm anuales (Ferreira *et al.*, 2002; García *et al.*, 2017; Guzmán *et al.*, 2008; Pascual, 1995), sin embargo, en vid para vinificación no es recomendable cubrir la demanda total del cultivo, ya que a mayor disponibilidad de agua, la planta desarrolla mayor área foliar convirtiéndose en problemas de manejo, incrementando los rendimientos y afectando directamente la calidad del fruto final, además de incrementarse los costos de producción (Uriarte *et al.*, 2014).

Para lograr un manejo correcto de la demanda hídrica del cultivo es necesario disponer de indicadores que describan el estado hídrico de la planta y que permitan evaluar si las aplicaciones de riego son o no las apropiadas para el cultivo. La **observación en campo** es la principal forma de determinar el grado de estrés hídrico que presenta el cultivo en cualquiera de las etapas de su desarrollo, ya que se observa el verdor de la hoja, grado de marchitamiento, ángulo del peciolo, crecimiento de los entrenudos, etc., sin embargo, no es un indicador exacto de los requerimientos hídricos de la planta; el **potencial hídrico y xilemático de las hojas** es una medida que permite determinar el grado de estrés hídrico en el momento de la medición (Domingo *et al.*, 2005; Williams *et al.*, 2005; Baeza *et al.*, 2007), éstas variables se determinan en campo utilizando una cámara de presión Scholander (Scholander *et al.*, 1965), sin embargo, son técnicas tardadas, complejas y costosas, además de presentar limitaciones en la medición del estrés en vid, ya que *Vitis vinifera* presenta un comportamiento isohídrico, es decir que: la planta cierra sus estomas cuando se presenta una deficiencia hídrica en suelo o cuando la condición atmosférica aumenta la demanda de agua (Hugalde y Vila, 2014); otro indicador del estrés hídrico del cultivo es la **termografía de infrarrojos**, ésta permite conocer la temperatura de la planta respecto a la temperatura del ambiente, cuando la temperatura de la planta está por encima de la temperatura del ambiente se muestra un grado de estrés en el cultivo, mientras que, temperaturas del dosel por debajo de la temperatura del ambiente no reflejan estrés hídrico y a partir de este método puede determinarse en Índice de Estrés Hídrico del Cultivo CWSI (Idso, 1981); el **Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)** es un índice obtenido a partir del procesamiento de imágenes satelitales, el cual permite identificar masas de agua, zonas de suelos con saturación de humedad,

la distribución espacial del estrés hídrico de la vegetación y su comportamiento en una evolución temporal en tiempo real, misma que se ha convertido en una herramienta tecnológica importante en la agricultura de precisión (Gao, 1996). Estudiar el contenido de humedad de una zona agrícola es de gran importancia, ya que de esto depende el funcionamiento fisiológico de la planta, de manera que, si el contenido de humedad se ve alterado en la productividad de los ecosistemas, la evapotranspiración, el crecimiento celular y la fotosíntesis serán afectados (Boyer, 1995).

El uso de la teledetección espacial permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales, y dentro de sus muchas aplicaciones su uso en la determinación de la distribución hídrica favorece el análisis de fenómenos y áreas de interés en tiempo real y temporal. Sobrino en el año 2000 presentó las ventajas siguientes del uso de la informática espacial:

- Cobertura global sinóptica, que proporciona información de cualquier parte de la superficie del planeta.
- Frecuencia temporal y actualización de datos, que proveen datos de forma continua con una frecuencia temporal que depende del sensor de interés. Como el caso de Landsat que proporciona una resolución temporal de 26 y 16 días.
- Homogeneidad de datos, ya que los datos obtenidos se registran en un mismo instrumento con un sistema de medición único.
- Formato digital, que permite trabajar la información obtenida en diferentes software además de agilizar el tratamiento digital de la imagen.
- Aplicaciones multidisciplinarias, que es una de las ventajas más importantes, ya que la teledetección como fuente de información proporciona datos que son utilizados en diferentes áreas de la ciencia.

Al trabajar con imágenes satelitales se debe de tomar en cuenta la resolución de un sensor, y ésta se define como la habilidad para registrar y discriminar información. La resolución del sensor considera la calidad de la información obtenida en una imagen considerando cuatro aspectos: resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal (Sobrino, 2000), mismas que se describen seguidamente.

- **Resolución espacial:** Está dada por el campo de visión instantáneo y depende de la apertura del dispositivo óptico del sensor, además de la altura orbital, velocidad de exploración y el número de detectores, dicha resolución está asignada para la unidad mínima de la imagen, que es el pixel. La resolución espacial marca el nivel de detalle que ofrece una imagen, y cuanto menor es el tamaño del pixel mejor será la resolución que se ofrece.
- **Resolución espectral:** Expresa la capacidad de captar diversas longitudes de onda, lo que depende del filtro óptico que separa la radiación en bandas espectrales. La resolución espectral revela el número y el ancho de bandas que el sensor registra, a mayor sea el número de bandas mejor será la resolución, es decir que el sensor utilizado presenta una mayor capacidad de reproducir la respuesta espectral.
- **Resolución radiométrica:** Se refiere a la sensibilidad de un sensor y a la expresión de la aptitud de la banda espectral, condicionada por los intervalos de digitalización de la señal. La resolución radiométrica se observa en una imagen por el número de tonos en una escala de grises, ayudando a un mejor tratamiento e interpretación de resultados. El número de niveles en la escala de grises varía respecto al sensor; la mayoría de los sensores en la actualidad presentan una resolución radiométrica de 0-256, con excepción de NOAA que trabaja con 1024 niveles. De manera que cuanto mayor sea el número de niveles, mejor resolución radiométrica tendrá una imagen.
- **Resolución temporal:** Esta resolución está en función de la frecuencia en que el sensor es capaz de adquirir una imagen de la misma porción de la superficie terrestre. La resolución temporal está en función del objetivo de la información captada por el sensor, además de la altura, velocidad, inclinación, ángulo y abertura en que se encuentra el sensor. Entre menor sea el tiempo de adquisición de imágenes en el mismo punto terrestre mayor será la resolución temporal.

Para la determinación de la variabilidad del NDWI de la zona en estudio se trabajó con imágenes del satélite LANDSAT-8 con el sensor Operacional de Imágenes de Tierra (OLI). El satélite fue puesto en órbita en el 2013, el cual es un satélite de resolución media y tiene como objetivo proporcionar información que contribuya a las actividades de agricultura, ciencia y otras aplicaciones también importantes (USGS. 2013).

Las imágenes OLI se conforman de 9 bandas espectrales desde el espectro visible hasta el infrarrojo de onda corta, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan sus aplicaciones.

Cuadro 26. Variables de interés del Sensor LANDSAT-8 OLI (USGS, 2013).

Resolución LANDSAT-8 OLI	
Espacial	30 m
Espectral	9 bandas
Radiométrica	12 bits
Temporal	16 días

5.1.1 Preprocesamiento de las imágenes satelitales Landsat-8 OLI

Las imágenes de satélite pueden llegar a presentar errores radiométricos que se relacionan con los instrumentos de los satélites, además de presentar perturbaciones derivadas de la dispersión atmosférica tales como nubosidad, niebla, vapor de agua, partículas de polvo, aerosoles y radiancia intrínseca, éstos errores radiométricos y factores atmosféricos interfieren en el procesamiento e interpretación de las imágenes, por estas razones es que es sumamente importante realizar un preprocesamiento a las imágenes para posteriormente realizar el tratamiento y la interpretación del NDWI (Sobrino, 2000; Aguilar *et al.*, 2014; Corrales y Ochoa, 2016).

Corrección radiométrica

Para obtener una corrección atmosférica adecuada es necesario realizar en un primer momento una corrección radiométrica que permitirá convertir los valores originales de cada pixel de la imagen a valores de radiancia y posteriormente ésta se convertirá en valores de reflectancia (Aguilar *et al.*, 2014).

Para la corrección radiométrica de las imágenes a trabajar en éste capítulo se trabajó con el Software Environment for Visualizing Images (ENVI) 5.1.

Radiancia

La ecuación descrita en la Figura 99 fue utilizada para la determinación de los valores de radiancia, ecuación que fue trabajada en la herramienta Landsat Calibration de ENVI 5.1. Para determinar los valores de radiancia se utilizan los coeficientes de cambio de escala de ganancia y sesgo, mismos que se proporcionan en el archivo de metadatos de cada imagen, los cuales atribuyen el nombre al método Ganancia y Sesgo (USGS, 2017).

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale}$$

Figura 99. Ecuación de conversión de valores de nivel digital a valores de radiancia (USGS, 2017).

En donde:

L_λ	Valor de radiancia espectral
$G_{rescale}$	Ganancia de banda
Q_{cal}	Número Digital
$B_{rescale}$	Perdida de banda

La ecuación de conversión a radiancia determina que los valores de nivel digital se multiplican por la ganancia que registra el sensor y a esto se suma la pérdida del mismo.

Reflectancia

Los valores de reflectancia son trabajados en la herramienta Landsat Calibration de ENVI 5.1, quien se encarga de ajustar los valores obtenidos en el proceso de radiancia, considerando parámetros propios de la imagen, tales como la fecha de captura de la imagen, elevación del sol y propiedades del sensor, las variables se obtienen del archivo de metadatos de cada imagen (USGS, 2017).

La Figura 100 muestra la ecuación para la conversión de valores de radiancia a valores de reflectancia.

$$\rho_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos\theta_s}$$

Figura 100. Ecuación de conversión de valores de radiancia a valores de reflectancia (USGS, 2017).

En donde:

ρ_λ	Valor de reflectancia
d	Fecha de captura de imagen
$ESUN_\lambda$	Irradiación solar por cada banda
θ_s	Valor zenit solar
L_λ	Valor de radiancia espectral

Corrección atmosférica

La corrección atmosférica permite obtener imágenes de mejor calidad visual, ya que se logra eliminar el componente intrusivo de la atmósfera tales como el efecto de los aerosoles, partículas de polvo, nubosidad, radiación intrínseca, entre otros (Aguilar *et al.*, 2014).

López en 1991 recomendó realizar la corrección atmosférica cuando el procesamiento incluye cálculos, determinación de índices o correlaciones donde intervienen varias bandas de las imágenes, ya que los componentes intrusivos aumentan cuando se hacen combinaciones de canales.

Después de haber realizado una corrección radiométrica a las imágenes de interés se realiza la corrección atmosférica para cada una de ellas. La corrección atmosférica de las imágenes LANDSAT-8 OLI, analizadas en el presente estudio, se trabajó en el módulo avanzado Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLASSH) disponible en el software ENVI 5.1 (Aguilar *et al.*, 2014). El modelo FLASSH se basa en el algoritmo de transferencia de radiación Modtran, el cual busca eliminar los efectos de la absorción y dispersión, causado por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión (Berk *et al.*, 2000; Kruse, 2004).

Al término de la ejecución del módulo FLASSH de corrección atmosférica, la imagen resultante contendrá datos en reflectancia espectral.

Corrección de remuestreo de pixel

Con el objetivo de obtener una mayor resolución en las imágenes del estudio, se realizó un proceso de remuestreo, el cual permite alcanzar un mayor nivel de detalle en las imágenes que cuentan con una baja resolución espacial. El proceso de remuestreo logra modificar el tamaño de la celda de una imagen, sin embargo, la extensión de la data raster permanece igual (ArcGIS Desktop. 2018).

La modificación de la resolución espacial se propone en el siguiente estudio, ya que el área de interés es muy pequeña (Finca 1: 11 hectáreas y Finca 2: 1 hectárea) y la misma era cubierta por no más de 110 pixeles de una resolución espacial de 30 m x 30 m, la información obtenida con esa resolución se generalizaba y era burda a la vista del lector.

Existe una gran cantidad de métodos de remuestreo que permiten calcular el valor de pixel respecto a los objetivos del estudio. Desde el método más común como la asignación del vecino más cercano hasta la determinación del promedio vectorial (ArcGIS for Desktop, 2016).

El remuestreo de las imágenes en estudio se llevó a cabo en el módulo de Remuestreo dentro del Procesamiento raster en la extensión ArcMap 10.2 de ArcGIS. Las técnicas de remuestreo disponibles en ArcMap 10.2 son: Asignación del vecino más cercano, Interpolación bilineal y Convulsión cubica (ArcGIS Desktop, 2018); el proceso de remuestreo se trabajó con el método Bilineal, el cual se recomienda para trabajar las imágenes satelitales por ser un raster continuo, éste modelo “determina un nuevo valor de la celda basándose en promedios de distancia ponderada de los cuatro centros de celda de entrada más cercanos” (ArcGIS Desktop, 2018) y crea un resultado suavizado discreto con un menor tiempo de procesamiento que el método cubico.

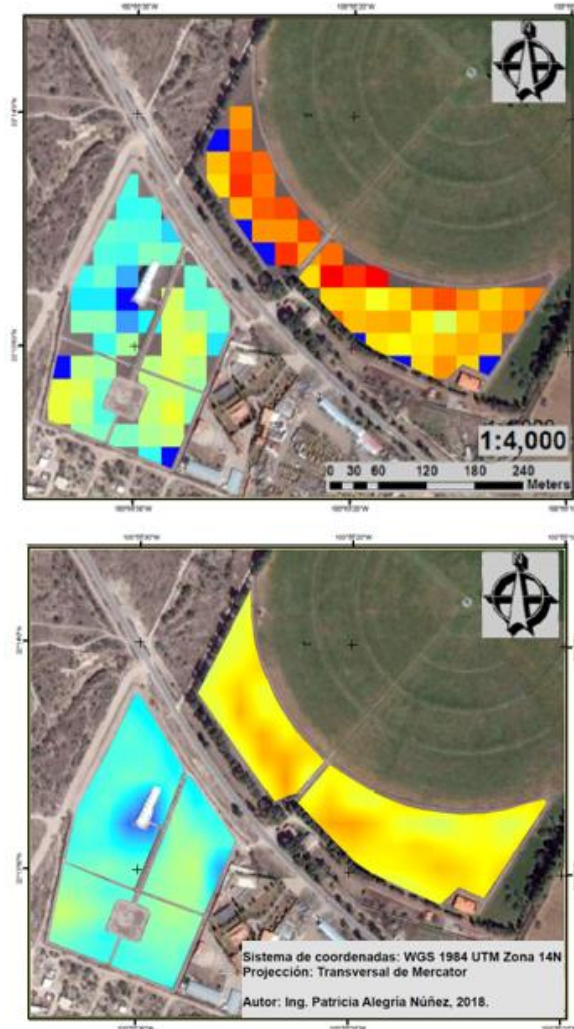


Figura 101. Comparación de resolución espacial de 30 m respecto a 1 m, en Finca 1.

5.2 Índice Diferencia de Agua Normalizado (NDWI)

La humedad del suelo es una de las variables importantes en la sanidad de la vegetación y se refleja en el estado hídrico de la planta, condiciones de deficiencia de humedad en suelo provocan un estrés hídrico en el cultivo que afecta directamente el rendimiento y calidad del fruto (Lissarrague, 2012).

La detección remota del agua en la vegetación y en el suelo tiene aplicaciones importantes en el sistema agrícola y forestal, pues se logra identificar zonas con estrés hídrico o propensas a éste, facilitando la toma de decisiones en la programación de riegos, ya sean preventivos o correctivos (Gao, 1996).

Uno de los índices más utilizados en la tecnología de percepción remota para la identificación de masas de agua es el Índice Diferencial de Agua Normalizado, el cual fue diseñado con el objetivo de maximizar la reflectancia del agua, McFeeters propone en 1996 el modelo de NDWI basado en la relación de la banda verde y el Infrarrojo cercano (Figura 102), ésta ecuación propone resaltar las zonas con presencia de agua superficial para cuantificar su extensión y volumen a partir de maximizar la reflectancia del agua utilizando la banda verde y minimizar la alta reflectancia de la vegetación y del suelo con la banda del infrarrojo cercano. El rango del valor del NDWI oscila entre -1 y +1, zonas con presencia de masas de agua muestran valores positivos cercanos a 1, mientras que la vegetación, el suelo y las rocas muestran valores de cero o negativos (-1), sin embargo, en el área agrícola y forestal surgió la necesidad de identificar y cuantificar la cantidad de agua que posee la vegetación y el nivel de saturación de humedad de un suelo, por lo que Gao en el mismo año (1996) propone una corrección a la ecuación (Figura 103) establecida por McFeeters, en donde el objetivo principal es resaltar la presencia de masas de agua, estado hídrico de la vegetación y la saturación de humedad del suelo.

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Figura 102. Ecuación para la determinación de NDWI con el uso de la banda verde y el infrarrojo cercano (McFeeters, 1996).

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Figura 103. Ecuación para la determinación de NDWI con el uso de la banda del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio (Gao, 1996).

Los valores de NDWI propuesto por Gao en 1996 van desde -1 a +1, y estos valores describen la superficie analizada ya sea vegetación o suelo con contenido de agua o con ausencia de ésta. Valores positivos reflejan contenido de humedad y conforme se acercan a +1 el contenido de humedad es mayor en suelo y en la vegetación no hay presencia de estrés hídrico y conforme se aleja del +1 se muestra una deficiencia hídrica en suelo y en la vegetación, de forma que los valores de cero muestran un suelo sin presencia de humedad y una vegetación extremadamente estresada, por el contrario, valores negativos reflejan suelo sin presencia de vegetación o agua y la presencia de suelo rocoso.

El NDWI es empleado como una técnica de medida para el estudio de la distribución espacial del estrés hídrico de la vegetación y su evolución temporal, además, permite la generación de un plan de manejo que garantiza la gestión del recurso hídrico en el momento que la planta lo demande.

5.3 Interpretación de mapas esquemáticos del NDWI

La presente investigación constó de la búsqueda, descarga y preprocesamiento de imágenes de satélite LANDSAT-8 OLI, además, se realizó el procesamiento de la información para la determinación del NDWI para seis fechas de análisis en cada una de las fincas en estudio de la zona de viñedos del municipio de San Luis Potosí.

Cuadro 27. Fechas de toma de imágenes de satélite LANDSAT-8 OLI.

Finca de análisis	Fecha de vuelo
Finca 1 y 2	20 de octubre del 2017
Finca 1 y 2	05 de noviembre del 2017
Finca 1 y 2	23 de diciembre del 2017
Finca 1 y 2	08 de enero del 2018
Finca 1 y 2	01 de mayo del 2018
Finca 1 y 2	01 de junio del 2018

Las imágenes en estudio no presentan las mismas fechas de análisis que en la determinación del NDVI ni de la $ET_{c_{aj}}$, ya que la resolución temporal del sensor LANDSAT 8-OLI es de 16 días y éstos no coinciden con las fechas de ejecución del vuelo con el VANT. Así que las fechas en estudio del NDWI son las más próximas a las fechas de interés.

Dado que el objetivo del estudio es conocer el grado de estrés hídrico en que se encuentra el área productiva del cultivo de la vid. Se trabajó en el módulo Raster Calculator en la extensión ArcMap 10.2 de ArcGIS, utilizando la ecuación propuesta por Gao en 1996 (Figura 103).

La primera determinación del NDWI es para el día 20 de octubre del 2017 en la Finca 1, en la fecha en estudio la planta se preparaba para iniciar el periodo de agostamiento. La Figura 104 muestra la distribución de los valores de NDWI en donde se observa que el bloque Este de la zona de estudio presenta una distribución con valores menores a 0, catalogándose como una zona bajo estrés hídrico, ya que durante este periodo no se presentaron riegos, puesto que éstos se concluyeron en el mes de septiembre (riegos de recuperación); el bloque Oeste de la zona de interés muestra valores menos negativos que el bloque Este y mayores a 0, por lo que se infiere una presencia de poca humedad y vegetación verde, mientras que en el centro del bloque Oeste se observa una zona con tonalidades de color azul, ésta corresponde al sector trasero de la bodega de procesamiento, zona que ha presentado un grado de encharcamiento durante todo el año ya que se vierte el agua utilizada para el lavado de la bodega y ésta se concentra y su evaporación e infiltración es difícil.

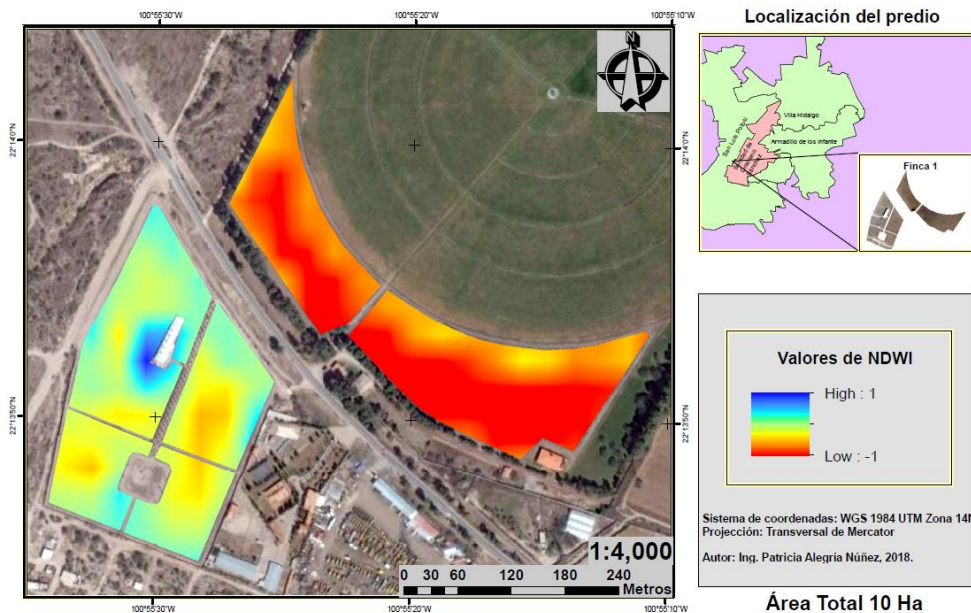


Figura 104. Determinación del NDWI, preparación para el periodo de agostamiento. A 20 días del mes de octubre del 2017.

La Figura 105 muestra la determinación del NDWI en la Finca 2 para el día 20 de octubre del 2017. La distribución de la humedad en el sector productivo se presenta con un valor de NDWI de 0 hasta -1 para el 65% de la zona productiva, la cual presenta un alto grado de estrés hídrico, ya que la planta presentó daños en la canopia por los frentes fríos presentados en la zona durante el mes de octubre, lo cual indujo en la preparación del periodo de agostamiento.

El bloque que presenta tonalidades en color azul de la parte Sur de la zona de estudio muestra valores positivos cercanos a +1, lo que se atribuye a la influencia del estanque presente en la zona centro de la Finca, ya que al realizar el proceso de remuestreo el nuevo valor de la celda se determina basándose en promedios de distancia ponderada de los cuatro centros de celda de entrada más cercanos, por lo tanto, se toman en consideración los valores presentes en el estanque al momento de realizar el proceso de remuestreo.

Para la fecha del 05 de noviembre del 2017 se muestran las figuras 106 y 107 en las que se analizan los valores de NDWI para la Finca 1 y Finca 2, respectivamente. Las zonas con coloración azul presentan valores positivos cercanos a +1 y se encuentran en la misma ubicación que en el día 20 de octubre, presentando un comportamiento similar con un menor grado de humedad, alcanzando valores de NDWI de 0.98. Las zonas con mayor grado de estrés de ambas fincas en estudio muestran valores que van desde 0 hasta -0.82, es decir la zona presenta deficiencia hídrica en suelo y planta.

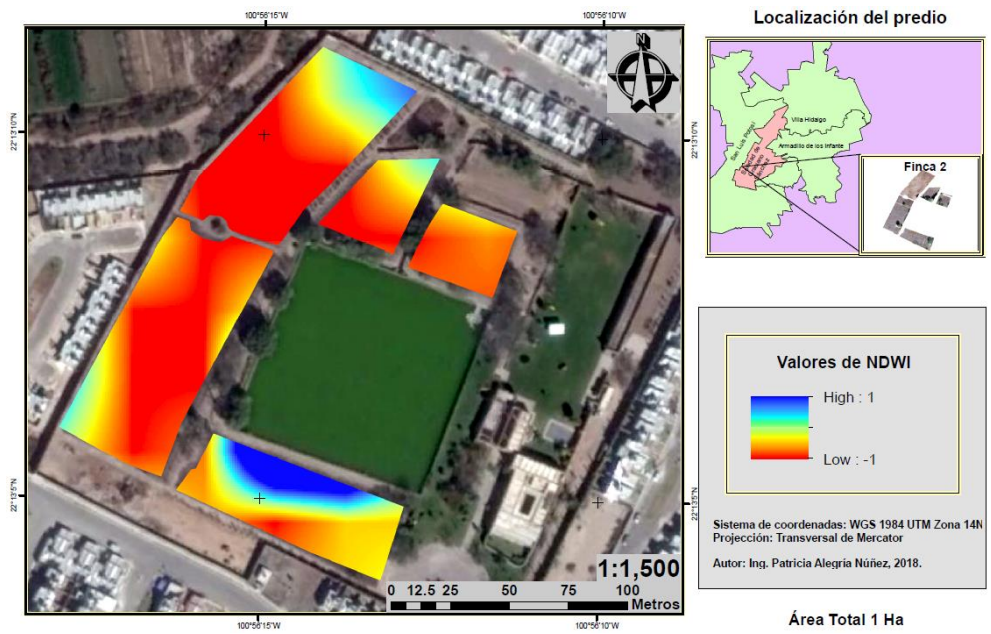


Figura 105. Determinación del NDWI, preparación para el periodo de agostamiento. A 20 días del mes de octubre del 2017.

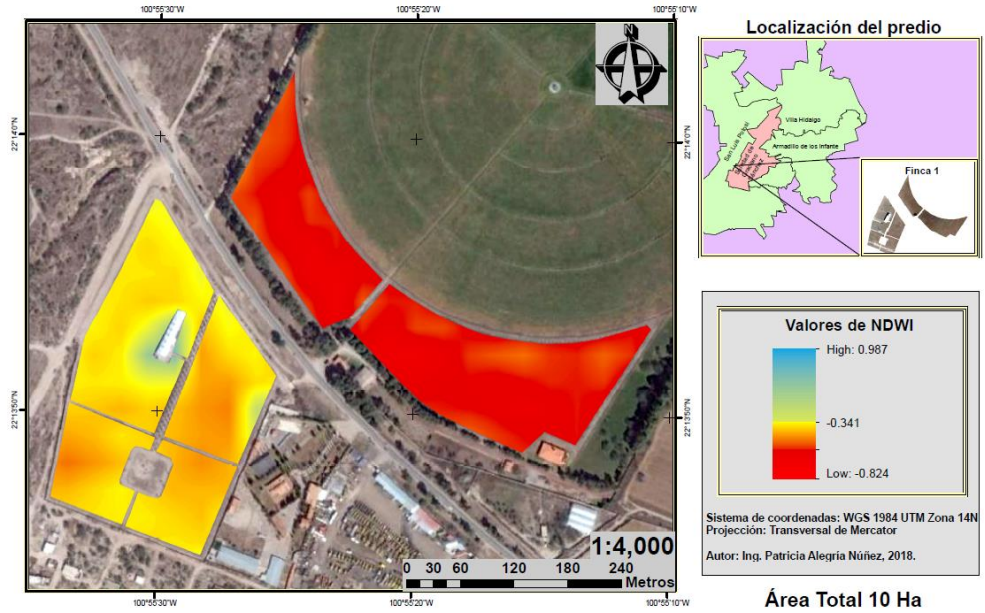


Figura 106. Determinación del NDWI, inicios del periodo de agostamiento. A 05 días del mes de noviembre del 2017.

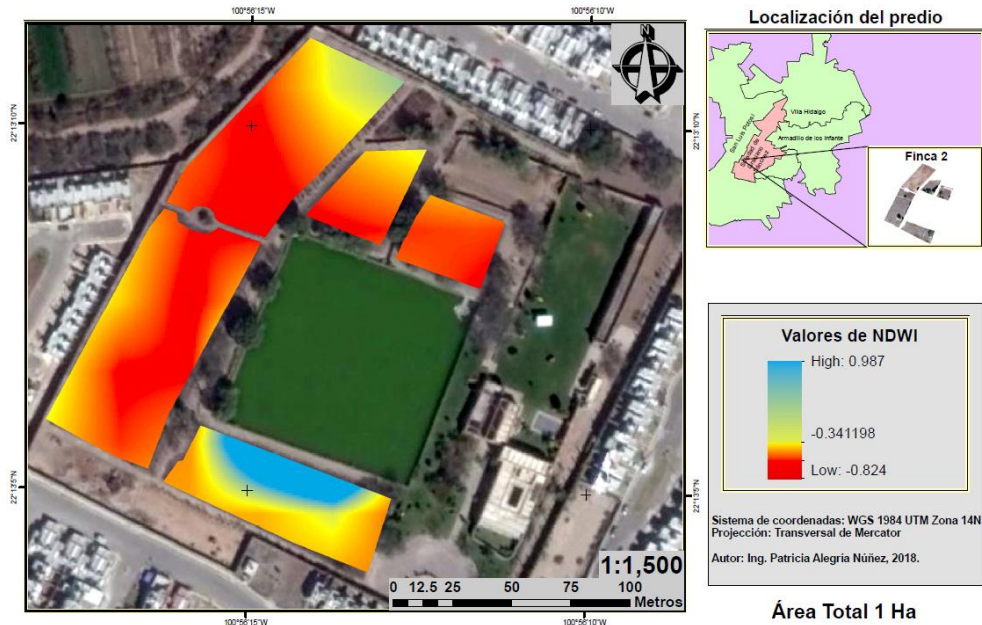


Figura 107. Determinación del NDWI, inicios del periodo de agostamiento. A 05 días del mes de noviembre del 2017.

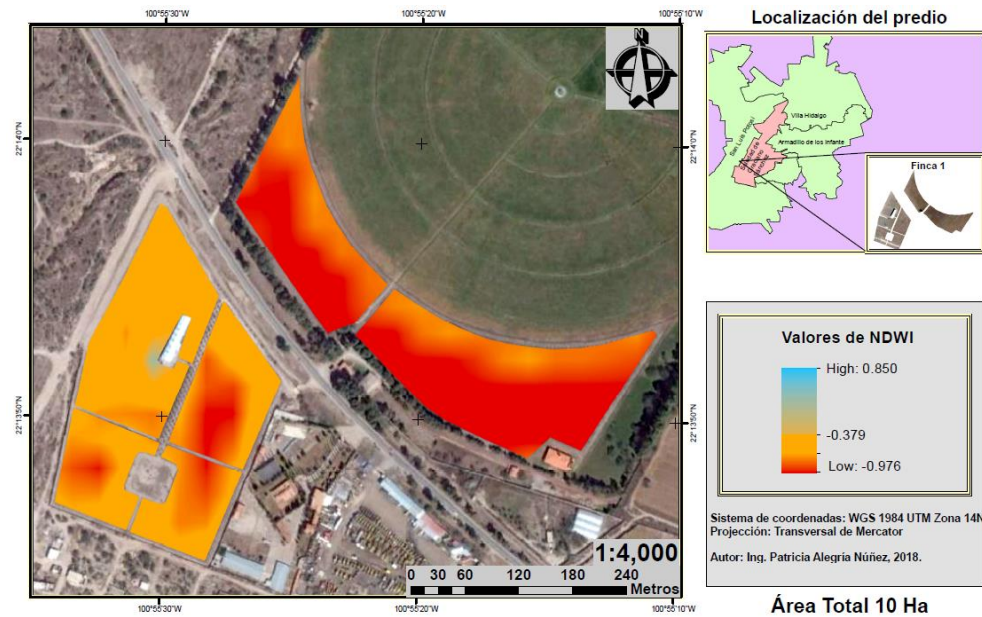


Figura 108. Determinación del NDWI en el periodo de inicio del reposo invernal. A 23 días del mes de diciembre del 2017.

Conforme pasan los días el cultivo de la vid reduce su grado de vigorosidad, ya que termina el periodo de agostamiento y comienza la fase de reposo invernal, durante ésta etapa la planta no cuenta con biomasa aérea, ya que toda la hoja cayó al suelo durante el periodo de agostamiento y con la ayuda de las heladas se logró culminar el ciclo vegetativo de la vid.

Cabe mencionar que en el año 2017 es la primera vez que la planta de vid presentó una caída total de la hoja, entrando en reposo invernal sin la necesidad de podar la planta. Durante el mes de diciembre se presentó el periodo de reposo invernal en las dos fincas en estudio, y no hubo presencia de lluvias ni riegos, por lo que se esperaba encontrar un valor de NDWI por debajo de 0. Las figuras 108 y 109 presentan la distribución del NDWI para el día 23 de diciembre, y éstas muestran valores positivos en poca área de la zona productiva, con respecto a la Finca 1 la zona con mayor concentración de humedad es el bloque trasero de la bodega, mientras que en la Finca 2 sigue siendo la zona Sur.

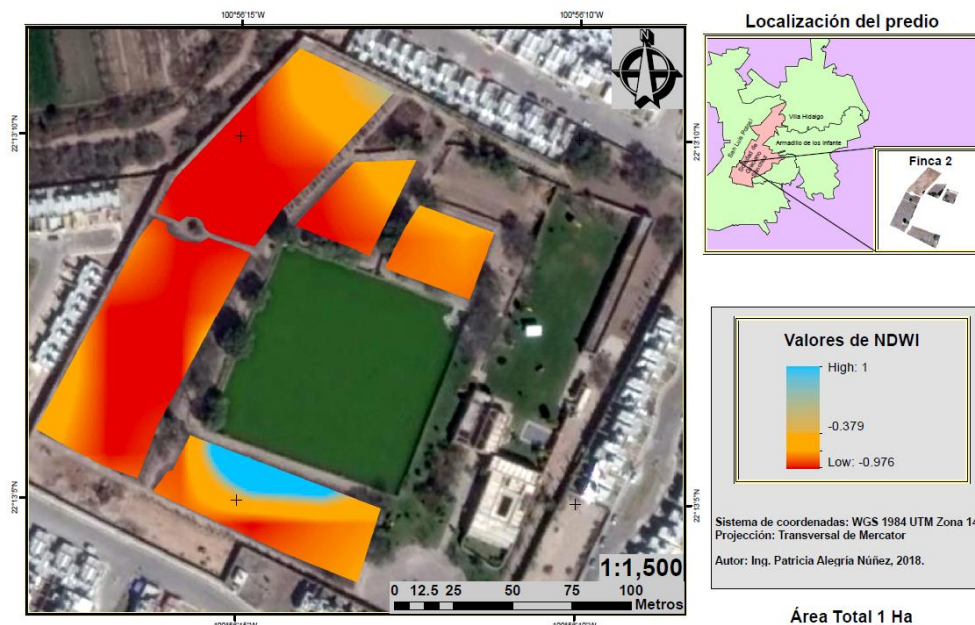


Figura 109. Determinación del NDWI en el periodo de inicio del reposo invernal. A 23 días del mes de diciembre del 2017.

Las figuras 110 y 111 corresponden a la determinación del NDWI para el día 08 de enero del 2018, durante este periodo el cultivo se encontraba aun en reposo invernal sin presencia de riego, sin embargo, la zona trasera de la bodega (Finca 1) y la zona Sur de la Finca 2 presentaban el mayor grado de humedad, con valores por encima de 0.3 de NDWI, mientras que el resto del área de análisis mostró una deficiencia hídrica en suelo y planta.

Durante el mes de mayo la planta de vid comenzaba el periodo de floración, etapa donde el cultivo demanda un 10% del recurso hídrico del total de su necesidad (García *et al.*, 2017). La quinta fecha de análisis fue el 01 de mayo del 2018 y corresponde a las figuras 112 y 113, en este periodo se observa una recuperación del nivel del NDWI en ambas fincas, alcanzando valores máximos de 0.35 en la Finca 1 y 0.24 en la Finca 2, mientras que el valor menos positivo fue de 0.12 y 0.19 para la Finca 1 y 2, respectivamente, lo que determina que el 100% de la zona en estudio presentaba niveles bajos de humedad.

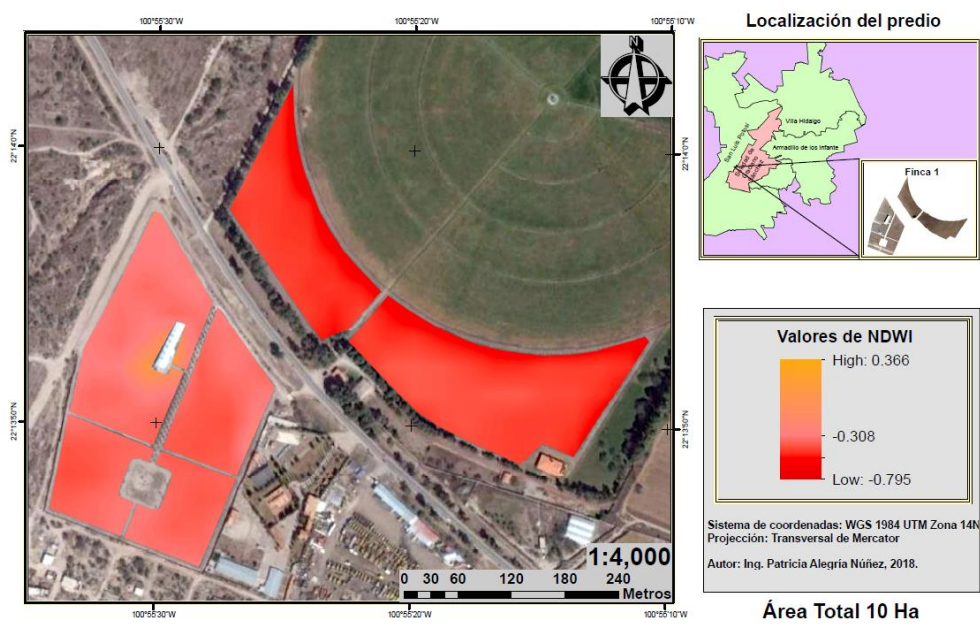


Figura 110. Determinación del NDWI en el periodo medio del reposo invernal. A 08 días del mes de enero del 2018.

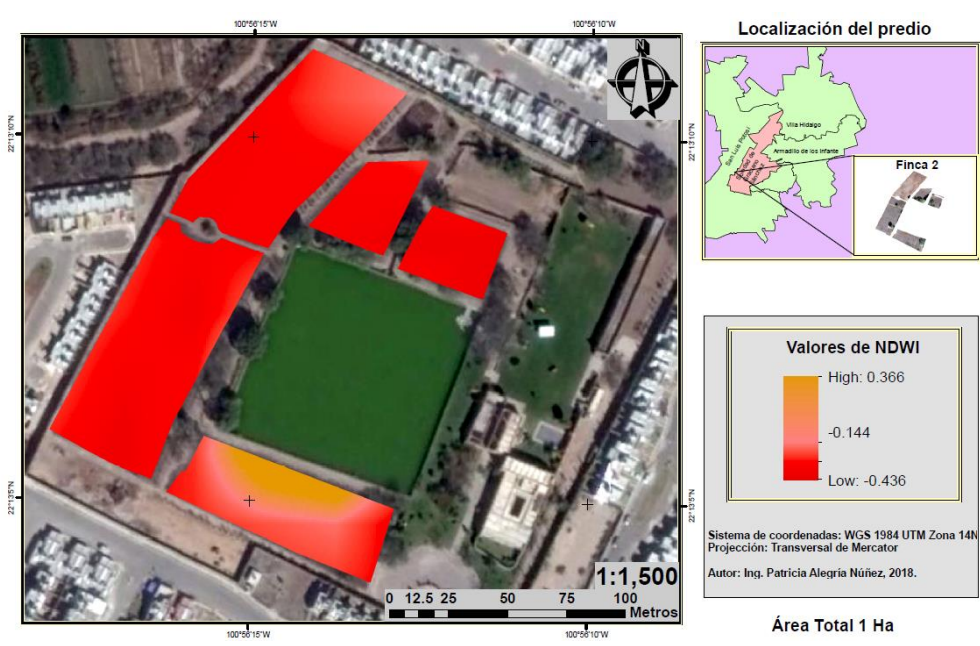


Figura 111. Determinación del NDWI en el periodo medio del reposo invernal. A 08 días del mes de enero del 2018.

En la determinación de humedad del día 01 de mayo del 2018 se encontró que el 100% del área productiva contaba con un grado de humedad poco considerable, en el suelo o en la vegetación, esto se atribuye a que la planta aún no alcanzaba el grado de brotación deseado para ser cuantificado.

Algunas variedades seguían en desarrollo de la biomasa aérea, lo anterior se respalda con el valor obtenido en el NDVI el cual varía para la vegetación de 0.1 hasta 0.47 (capítulo 3).

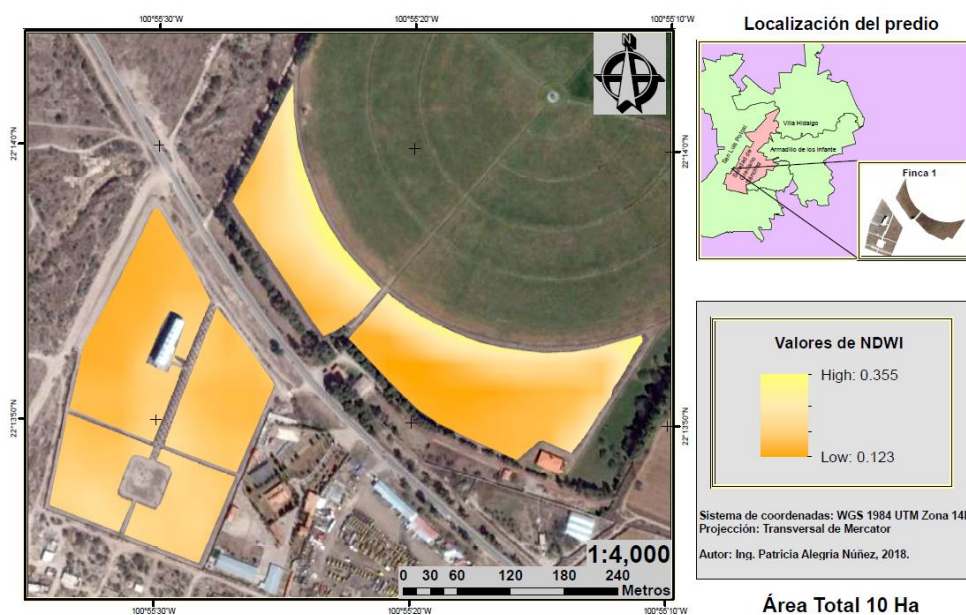


Figura 112. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de floración. A 01 día del mes de mayo del 2018.

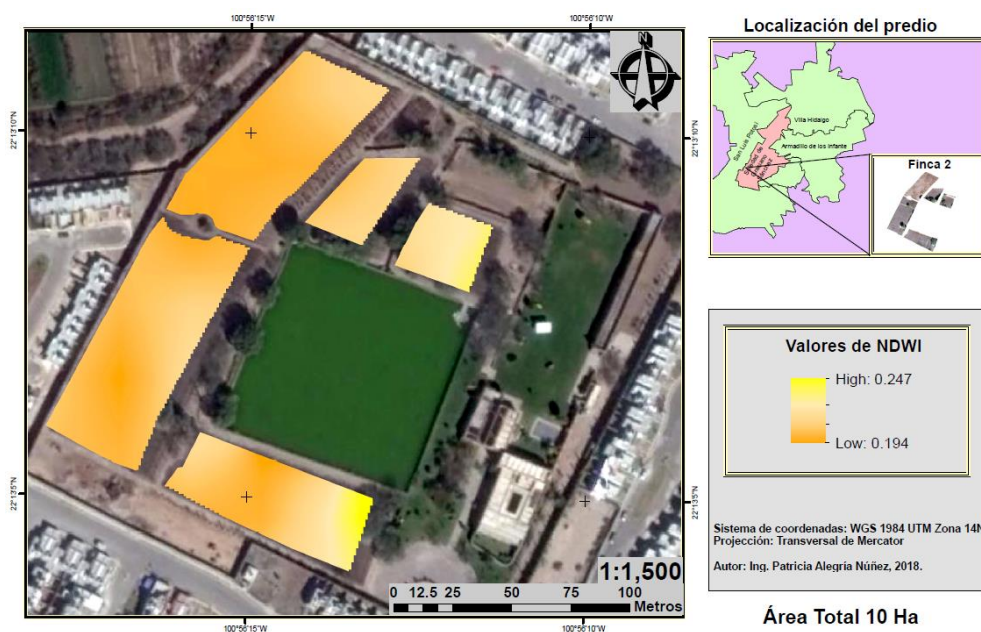


Figura 113. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de floración. A 01 día del mes de mayo del 2018.

La última fecha de estudio corresponde al día 01 de junio del 2018, y en las imágenes 111 y 115 se observa la distribución de la humedad en la Finca 1 y Finca 2, respectivamente. No se observa un incremento en la humedad del suelo y la vegetación con respecto al 01 de mayo del 2018.

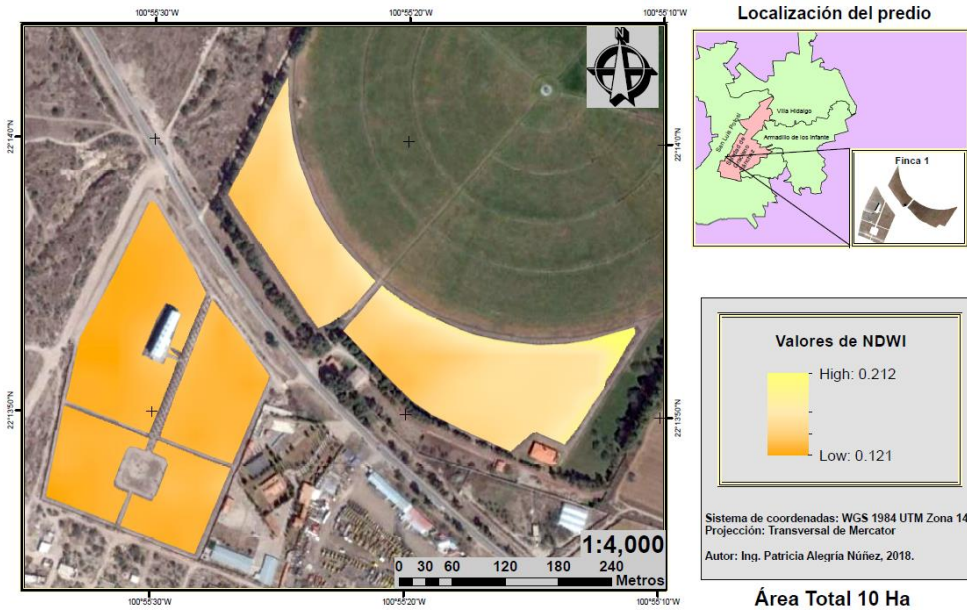


Figura 114. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de cuajado del fruto. A 01 día del mes de junio del 2018.

Para la fecha en estudio (01 junio 2018), se esperaba obtener valores cercanos a 1, ya que la planta de vid se encontraba en el periodo de cuajado del fruto y durante este tiempo el cultivo debió de registrar riegos intermitentes, sin embargo, se obtuvo un valor máximo de 0.24 y un valor mínimo de 0.12, por lo tanto, se infiere que en la zona productiva no hubo presencia de riego durante un periodo prolongado, a lo que se atribuyen el grado de estrés hídrico que presenta el cultivo. Por lo tanto, lo anterior se respalda con los valores obtenidos en la determinación del NDVI (menor promedio de 0.58) mostrando un alto grado de estrés hídrico (capítulo 3).

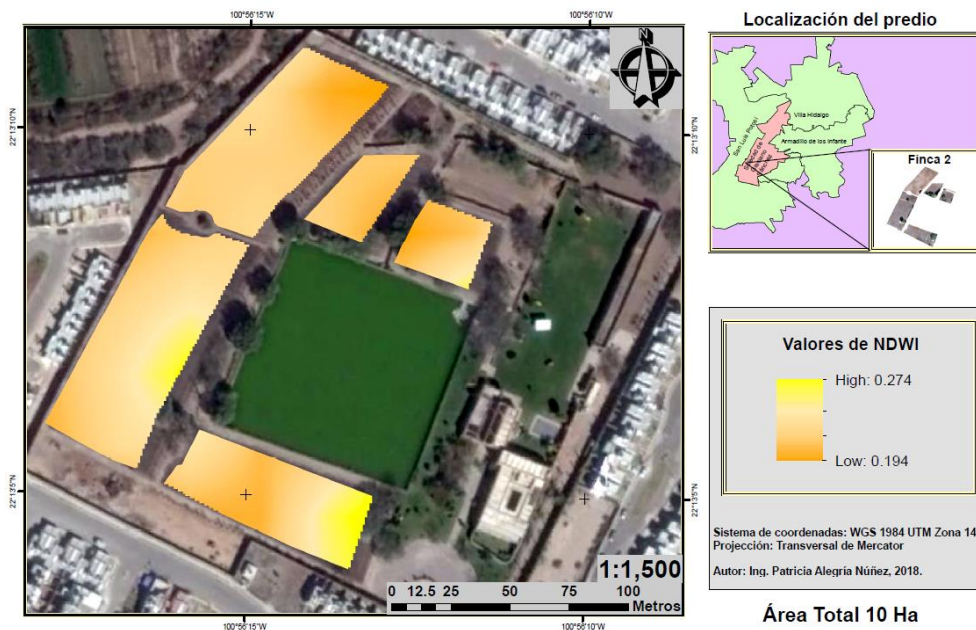


Figura 115. Determinación del NDWI en el inicio del periodo de cuajado del fruto. A 01 día del mes de junio del 2018.

5.4 Conclusiones del capítulo 5

- ❖ Uno de los indicadores más utilizados en la tecnología de percepción remota que describe el estado hídrico del cultivo es el Índice Diferencia de Agua Normalizado, éste cumple el objetivo de resaltar las zonas con presencia de agua superficial para cuantificar su extensión y volumen a partir de maximizar la reflectancia del agua, además de identificar zonas con presencia de humedad en el suelo y el contenido de humedad de la vegetación.
- ❖ El uso de imágenes satelitales bajo las pertinentes correcciones radiométricas y atmosféricas permiten aplicaciones multidisciplinarias como la determinación del estado hídrico del cultivo con el uso del NDWI, ya que se logra visualizar y proporcionar información de la superficie terrestre de forma continua en formato digital.
- ❖ Un factor limitante con el uso de las imágenes satelitales es la ausencia de datos en el momento del análisis, ya que por la resolución temporal de los satélites podría no contarse con información del día y tiempo de interés.
- ❖ El modelo NDWI utilizado para la determinación del estrés hídrico del cultivo fue el propuesto por Gao en 1996, ya que permite identificar zonas con presencia de humedad en suelo y es un modelo sensible a los cambios en el contenido de humedad de la vegetación. El uso del NDWI mantiene como objetivo de esta investigación identificar el grado de deficiencia hídrica y su detección temprana para prevenir riesgos de la producción del cultivo de vid.
- ❖ El mes de octubre muestra un déficit hídrico con valores de NDWI por debajo de 0 en el 90% de la zona productiva para cada una de las fincas en estudio; durante el mes de noviembre se presenta una compensación hídrica en las dos fincas, alcanzando valores de 0.98 para el 45% de la línea fructífera, mientras que en el 65% restante se observan valores de NDWI por debajo de 0; para el mes de diciembre habiéndose presentado los primeros 9 frentes fríos los valores de NDWI se encontraban por debajo de 0 en un 80% del área analizada, presentando un alto grado de déficit hídrico en el suelo por la ausencia de riego y sin presencia de vegetación por el periodo de reposo invernal; durante el mes de enero los valores de NDWI en un 90% de las fincas estudiadas se encuentran por debajo de 0, lo anterior se atribuye al periodo de reposo invernal en el cultivo de vid; con respecto a los meses de mayo y junio la planta presentaba un desarrollo vegetativo, de floración y de llenado de fruto, de ahí que se presentó una recuperación en el valor de NDWI alcanzando valores de hasta 0.35.
- ❖ El NDWI presentó un incremento en su valor en el mes de mayo, el cual se atribuye a la presencia de riegos o precipitación, mientras que el mes de junio muestra un descenso en el estado hídrico del cultivo, atribuyéndose a un periodo de tiempo prolongado sin presencia de riegos.

- ❖ El NDWI es un índice que debe considerarse independiente y actuar como un complemento en la interpretación del NDVI, $ET_{c\ aj}$ y CWSI, no debe de ser sustituido por alguno de los anteriores, ya que todos los modelos propuestos logran resaltar características propias en el estudio del estrés hídrico del cultivo de la vid.

5.5 Abreviaciones del capítulo 5

CWSI	Índice de Estrés Hídrico del Cultivo
ENVI	Environment for Visualizing Images
FLASSH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
GREEN	Banda verde
NDWI	Índice Diferencial de Agua Normalizado
NIR	Banda infrarrojo cercano
OLI	Operacional de Imágenes de Tierra
SWIR	Banda infrarrojo medio
USGS	Servicio Geológico de los Estados Unidos

5.6 Bibliografía del capítulo 5

- Aguilar, H., Mora, R., Vargas, C. 2014. Atmospheric correction methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 images with ENVI Flaash module software. *Geográfica de America Central*. N°53 Costa Rica (CR) ISSN 1011-48X. 21pp
- ArcGIS for Desktop. 2016. Funciones de raster: Función Remuestrear.
- ArcGIS Desktop. 2018. Conjunto de herramientas Procesamiento de raster: Remuestrear.
- Baeza, P., Sánchez de Miguel, P., Centeno, A., Junquera, P., Linares, R., Lissarrague, J. 2007. Water relations between leaf water potential, photosynthesis and agronomic vine response as a tool for establishing thresholds in irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae* 114: 151-158
- Berk, A., Anderson, G., Acharya, P., Chetwynd, J., Bernstein, L., Shettle, E., Matthew, M., Adler-Golden, S. 2000. MODTRAN4 user's manual.
- Boyer, J.S. 1995. Measuring the water status of plants and soils. Academic Press, Inc, Londres. 178 pp.
- Corrales, R., Ochoa, V. 2016. Cálculo de Reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE.
- Domingo, R., Nortes, P.A., Egea, G., Torres, R. y Pérez Pastor, A. 2005. Utilización de sensores en planta para la programación del riego y uso eficiente del agua en la agricultura. *Vida Rural*, 217: 42–46.
- Ferreyra, R., Selles, G., Peralta, J., 2002. Efectos de la restricción del riego en distintos periodos de desarrollo de la vid Cv. Cabernet Sauvignon sobre producción y calidad del vid. Chile (Ch). ISSN 0365 – 2807.
- Gao, B. 1996. Anormalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetación Liquid Water From Space. *Remote sens. Estados Unidos (EU)*. Environ 55257-266. 10 pp.
- García, F., Gil, M., García, P. 2017. El vino y su servicio. 2ª edición. Madrid (ES). ISBN: 978-84-283-3862-2
- Guzmán, C., Valenzuela, C., Félix, P., Jiménez, A., Ruiz, S., 2008. Necesidad hídrica de los principales cultivos en el estado de Baja California. INIFAP. México (MX). 35 pp.
- Hugalde, I., Vila, H. 2014. Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides. ¿Una controversia sin fin? Argentina (AR). ISSN 1669-2314. 8 pp.
- Idso, S., Jackson, R., Pinter, P., Reginato, R., Hatfield, J. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55. 12 pp.

- Kruse, F.A. (2004). Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH Atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO.
- Lissarrague, J., 2012. Consecuencias del déficit hídrico en viñedos de zonas cálidas y estrategias de riego en función de los objetivos de la producción de uva. III Jornadas de riego y nutrición: vid y olivar. España (ES). 7 pp.
- López, E. (1991). Corrección atmosférica en el espectro solar. Por J. Meliá (Ed). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Pascual, N., Cabrerizo, A., 1995. Distribución espacial del viñedo de Rioja en relación con las condiciones ambientales. España (ES). 22 pp.
- Recursos renovables: Agricultura. España (ES). [en línea] [consultado 12 de enero del 2018] Disponible en el World Wide Web: <https://www.researchgate.net/publication/40933495_La_Teledeteccion_en_el_seguimiento_de_los_fenomenos_naturales_recursos_renovables_agricultura_Valencia_25_febrero-9_marzo_1991>
- Scholander, P., Hammel, H., Bradstreet, E., Hemingsen, E. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339–346.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Using the USGS Landsat 8 Product. 2013. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. 2017 Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
- Sobrino, J. 2000. Teledetección. España (ES). ISBN 84-370-4220-8. 460 pp.
- Uriarte, D., Manca, A., Gómez, O., Prieto, M. 2014. Manual práctico de riego de vid para vinificación. CICYTEX. Departamento de Hortofruticultura, Grupo de riego y nutrición. España (ES). Dep. Legal: BA-235/2014. 16 pp.
- Williams, L., Trout, T. 2005. Relationships among Vine- an Soil- based measures of water status in a Thompson sedles vineyard in response to high-frecuency dril irrigation. *American Journal Enol. Vitic.* Vol. 56: 4.

CAPÍTULO 6

DETERMINACIÓN DE LA VARIABILIDAD DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO (CWSI).

6.1 Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI)

El estrés hídrico de las plantas es provocado por la deficiencia del recurso hídrico en el suelo, ya sea por falta de lluvia o de riego y es la principal causa de la reducción en el crecimiento del área foliar y de la senescencia de las plantas, y ocurre cuando la transpiración excede el agua absorbida por las raíces de la planta (Salisbury y Parke, 1968; Potters *et al.*, 2007; Shao *et al.*, 2008). La aclimatación de las plantas al estrés hídrico incluye una serie de mecanismos que permite modificar la entrada de agua hacia su canopia, entre ellos se encuentra el control estomático, siendo la respuesta inmediata y efectiva en contra de la reducción del contenido de agua en la planta (Lovisolo *et al.*, 2002; Chaves *et al.*, 2003; Chaves *et al.*, 2010; Domec y Johanson, 2012).

La vid es una planta que necesita de un uso adecuado del agua en el suelo y una buena distribución a lo largo de su desarrollo vegetativo y reproductivo, además, requiere una estrategia de riego controlado con el objetivo de inducir un estrés hídrico moderado en la planta, que contribuya a la obtención de un fruto con condiciones organolépticas deseables para la obtención de un vino de calidad (Sepúlveda *et al.*, 2016), sin embargo, a pesar de que el cultivo de vid necesita un grado de estrés hídrico en su desarrollo, éste debe ser controlado, ya que un exceso en el estrés hídrico puede afectar adversamente aspectos como rendimiento, composición de la baya y la sensibilidad sensorial de los compuestos del vino (Matese *et al.*, 2018). Aunque el cultivo de vid demanda un periodo de deficiencia hídrica es considerado como una especie que evita el estrés hídrico utilizando un control estomático estricto (cierre estomático) (Chaves *et al.*, 1987; Higgins *et al.*, 1992; Schultz, 2003, Chaves *et al.*, 2010) cuando el riesgo de estrés es alto, considerándose como una especie isohídrica a excepción de algunas variedades (Hugalde y Villa, 2014).

El control estomático se basa en la capacidad de la planta de inducir el cierre de los estomas que conduce a una reducción en la absorción de CO₂ y a una disminución de la transpiración de la planta (Monteith, 1995), lo que reduce el enfriamiento por transpiración (Vargas, 2015). El disminuir el grado de transpiración de la planta tiene como resultado un aumento en la temperatura de su dosel (Monteith, 1995), convirtiéndose en un indicador del estado hídrico del cultivo (Jackson, 1988). La determinación de la temperatura de dosel del cultivo es una herramienta práctica para estimar el estado hídrico de la vegetación a partir del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo, el cual se basa en la determinación de la temperatura de la cubierta vegetal del cultivo (T_c) y del ambiente (T_a), y se fundamenta en la relación que existe con el déficit de presión de vapor (DPV) (Jackson *et al.*, 1981).

6.1.1 Teoría del CWSI

El Índice de Estrés Hídrico del Cultivo es un indicador muy utilizado en la estimación de la deficiencia hídrica de los cultivos, se basa en la determinación de la temperatura del cultivo y del ambiente y se sustenta en delimitar los niveles mínimos y máximos de estrés que puede presentar un cultivo, ya sea por su disponibilidad o deficiencia de agua en el suelo (Taghvaeian *et al.*, 2012), los niveles máximos y mínimos se conocen como “non-water-stressed-baseline”, la línea de máximo estrés hídrico (UL) y nulo estrés hídrico(LL), estimados a partir de su relación del DPV con la Tc-Ta (Erdem *et al.*, 2005).

El método CWSI fue propuesto inicialmente por Jackson en 1977, el modelo fue utilizando para determinar el estrés hídrico en zonas de cultivo sin presencia de suelo desnudo; seguidamente en 1981 Idso propone una modificación para utilizar el modelo en cualquier zona de cultivo, incluyendo suelo desnudo y trabajando un modelo empírico basado en la teoría de balance energético, la cual se encarga de separar la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración (Jackson *et al.*, 1981), además de trabajar con los niveles mínimos y máximos de estrés que presenta el cultivo (Idso, 1982; Idso *et al.*, 1984).

Una vez determinado el CWSI los valores obtenidos del índice varían de 0 a 1 con respecto a la diferencia de temperatura del cultivo y del ambiente; un valor de 0 muestra una vegetación sin presencia de estrés hídrico, mientras que valores cercanos a 1 se presentan cuando el nivel de estrés hídrico incrementa y la planta deja de transpirar por mucho tiempo, lo que culmina en la fase de senescencia con un valor de CWSI de 1. Cuando una planta muestra una transpiración sin estrés hídrico, la temperatura de las hojas varía de 1°C a 4°C menos que la temperatura del ambiente, pero cuando la planta se somete a estrés hídrico, los estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta logrando alcanzar de 4°C a 6°C por encima de la temperatura del ambiente, mostrando un déficit hídrico alto (López *et al.*, 2009).

$$CWSI = \frac{[(Tc - Ta) - (Tc - Ta)LL]}{[(Tc - Ta)UL - (Tc - Ta)LL]}$$

Figura 116. Ecuación para la determinación de CWSI (Jackson *et al.*, 1981; Idso, 1982).

En donde:

Tc	Temperatura del dosel del cultivo
Ta	Temperatura del ambiente
UL	Límite superior, máximo estrés hídrico
LL	Límite inferior, nulo estrés hídrico

La presente investigación consta de la determinación del CWSI a partir de datos meteoroclimáticos de enero a diciembre para el año 2017, para lo cual se trabajó con el modelo empírico con base en un balance de energía y la determinación de los límites máximos y mínimos de estrés para cada variedad en estudio.

El enfoque empírico es aquel en el que se determinan los límites máximos y mínimos de estrés, trabajando con la diferencia de temperatura del cultivo y del ambiente, relacionada con el déficit de presión de vapor (Idso *et al.*, 1981); el método de balance de energía requiere de realizar estimaciones de la radiación neta y resistencia aerodinámica del cultivo (Jackson *et al.*, 1988).

El modelo a trabajar requiere del conocimiento de propiedades como la resistencia estomática, resistencia superficial, índice de área foliar, resistencia aerodinámica, radiación neta, radiación solar, radiación relativa, densidad del aire, flujo de calor, calor específico, calor latente, altura de planta, velocidad del viento, transferencia de calor, tiempo de insolación, temperatura ambiental, presión de vapor, déficit de presión de vapor, presión atmosférica, presión barométrica, densidad del aire, humedad relativa y presión de saturación (Matese *et al.*, 2018).

Las variables anteriormente descritas fueron calculadas utilizando las ecuaciones de Penman-Monteith (FAO, 2006).

El primer paso para la determinación del CWSI fue categorizar la zona de estudio por variedades de vid, seguidamente se determinaron variables como altura de planta, índice de área folia y resistencia estomática, para cada variedad y mes en estudio, lo anterior se realizó para determinar el CWSI para cada una de las variedades, ya que éstas presentan condiciones físicas diferentes entre ellas. Seguidamente se calculó la diferencia de temperatura entre el dosel del cultivo y el ambiente (Figura 117), además de los límites máximos y mínimos de estrés con las ecuaciones establecidas en las figuras 119 y 120.

$$T_c - T_a = \left[\frac{[r_a I_c R_n]}{[\rho_a C_p]} \right] \left[\frac{\left[\gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]}{\left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right) \right]} \right] - \frac{e_s - e_a}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)}$$

Figura 117. Ecuación para la estimación de Tc-Ta (Jackson *et al.*, 1981; Idso, 1982).

$$T_c - T_a = \left[\frac{[r_a I_c R_n]}{[\rho_a C_p]} \right]$$

Figura 118. Ecuación para la estimación del Límite superior (Jackson *et al.*, 1981; Idso, 1981).

$$T_c - T_a = \left[\frac{[r_a I_c R_n]}{[\rho_a C_p]} \right] \left[\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right] - \frac{e_s - e_a}{\Delta + \gamma}$$

Figura 119. Ecuación para la estimación del Límite inferior (Jackson *et al.*, 1981; Idso, 1981).

En donde:

T_c	Temperatura del dosel del cultivo °C
T_a	Temperatura del ambiente °C
r_a	Resistencia aerodinámica sec m ⁻¹
I_c	Coefficiente de intercepción de la radiación
R_n	Radiación neta W m ⁻²
ρ_a	Densidad del aire kg/m ⁻³
C_p	Calor específico del aire J kg °C
Δ	Pendiente de la curva de la presión de vapor a la temperatura del aire kPa °C
γ	Constante psicométrica kPa °C
r_c	Resistencia del dosel al flujo de vapor de agua sec m ⁻¹
r_a	Resistencia aerodinámica sec m ⁻¹
$e_s e_a$	Déficit de presión de vapor kPa

Una vez determinados los valores de $T_c - T_a$ y los límites mínimos y máximos para cada variedad en estudio se prosigue a graficar los valores con respecto al déficit de presión de vapor para generar las líneas de tendencia y la ecuación que se determinan a partir de los límites calculados, una vez obtenidas las ecuaciones se calcula en CWSI con base al DPV para cada fecha en estudio.

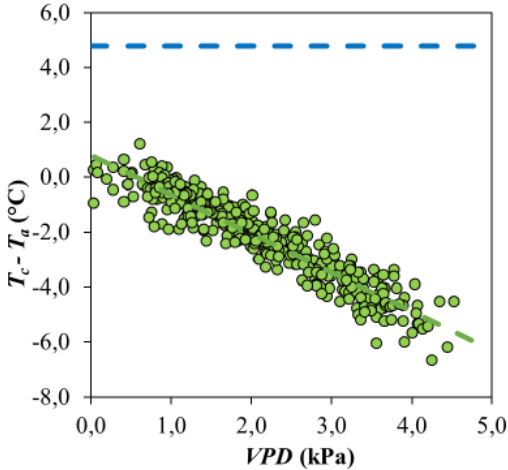


Figura 120. Ejemplo de la distribución de los valores máximos y mínimos de estrés y la generación de las líneas UL y el LL.

Otra manera de determinar la temperatura del cultivo es con el uso de la termografía infrarroja utilizando cámaras térmicas manuales o con el uso de VANT, éste método es el más completo y rápido ya que determina la temperatura de cada pixel en estudio en el momento que se desee realizar el análisis (López *et al.*, 2009; Sepúlveda *et al.*, 2016).

6.2 Estadísticas de la distribución del estrés hídrico a lo largo del ciclo vegetativo de la vid

La estimación de la temperatura del cultivo permitirá estimar el grado de estrés hídrico de las variedades de vid analizadas en cualquier momento de su desarrollo a partir del DPV presente en el día de estudio.

El DPV es la cantidad de vapor de agua que se necesita en un determinado momento para saturar la atmosfera. Es decir, la diferencia entre la cantidad de vapor de agua que puede retener la atmosfera y la cantidad de vapor de agua que contiene la atmosfera en ese momento (Hargreaves, 1994). El DPV es de gran importancia para la transpiración de las plantas, ya que un DPV elevado provoca un mayor grado de transpiración de la planta, sin embargo, cuando el DPV es muy elevado las plantas cierran sus estomas para evitar la pérdida excesiva de agua, teniendo afectaciones directas en la fotosíntesis (Allen *et al.*, 1998). Con un valor de DPV cercano a cero las plantas dejan de transpirar, debido a la saturación de la atmosfera con vapor de agua, es decir no hay espacio para el agua que la planta transpira, por lo tanto, deja de hacerlo (Itenfisu *et al.*, 2003).

Las figuras 121 y 122 muestran las líneas de base de estrés hídrico, límite superior y límite inferior, las cuales se determinaron a partir de las ecuaciones descritas en las figuras 117, 118 y 119 utilizando datos determinados en campo, datos meteorológico-climáticos y datos estimados con el uso del manual #56 de la FAO.

Las ecuaciones obtenidas y los valores de R^2 a partir de la relación de la temperatura del cultivo, los límites máximos y mínimos, y el DPV mostraron diferencias para cada variedad en estudio, de manera que los valores de R^2 para la T_c-T_a varían desde 0.8261 para la variedad de Viognier y 0.8715 para la variedad Sauvignon Blanc; el valor de R^2 para el límite inferior de las variedades en estudio se presenta desde 0.5626 para Viognier hasta un valor de 1 para Cabernet Sauvignon y Malbec, determinando que los modelos presentados para la determinación de los límites de estrés hídrico se ajustan bastante bien a las variables en estudio. A pesar de que existen variaciones en el valor del coeficiente de determinación, se logra apreciar en la distribución de los límites de estrés para cada variedad un comportamiento similar en las tres variables en estudio, a excepción de las variedades Sauvignon Blanc y Viognier.

La variedad Sauvignon Blanc presenta una pendiente suave y una intersección máxima en el UL de 4°C cuando el DPV es 2.25 kPa, mientras que el resto de las variedades muestra una temperatura mayor a 5.5°C en el mismo valor de DPV.

Los resultados muestran que bajo condiciones de baja humedad en el suelo el cultivar Sauvignon Blanc no logra ajustar su mecanismo estomático, permitiendo su continua transpiración e induciendo el estrés hídrico, por lo que se determina que la variedad Sauvignon Blanc presenta una mayor sensibilidad al DPV y logra presentar un grado de estrés hídrico antes que cualquiera de las otras variedades estudiadas, catalogándose como una variedad de vid con comportamiento anisohídrico bajo las características meteoro-climáticas de la zona en estudio.

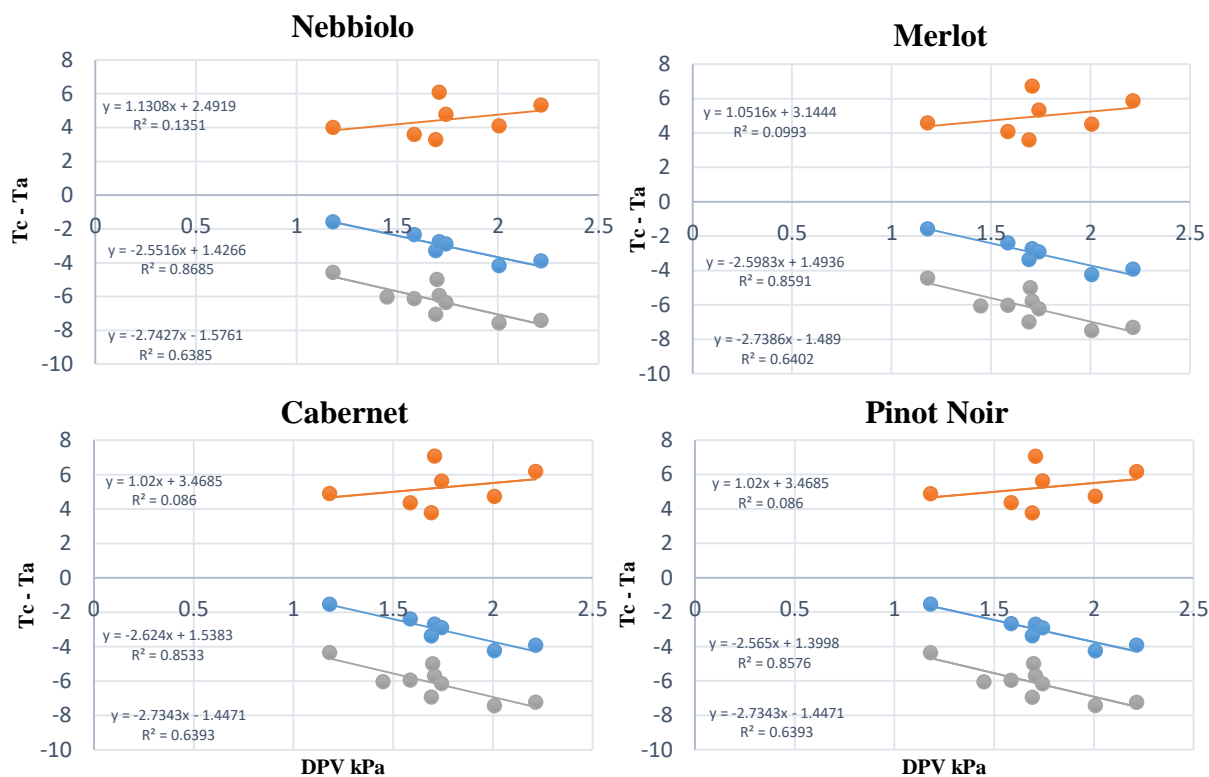


Figura 121. Relación entre la temperatura del dosel del cultivo menos la temperatura del ambiente (Tc-Ta) y el déficit de presión de vapor (DPV) para las variedades Nebbiolo, Merlot, Cabernet Franc y Pinot Noir en la Finca 1. La línea azul representa la diferencia de Tc-Ta respecto al DPV. La línea naranja representa el límite superior bajo estrés hídrico del cultivo (UL). La línea gris representa el límite inferior sin estrés hídrico del cultivo (LL).

Los valores de Tc-Ta variaron con respecto al DPV, la temperatura del cultivo se incrementa a medida que el DPV disminuye tendiendo a cero o cuando el DPV incrementa trepidantemente, de manera que al incrementar la temperatura del dosel el grado de estrés hídrico del cultivo será mayor, mientras que, a medida que el DPV se estabiliza en un nivel medio la diferencia de temperatura se hace negativa, por lo que la temperatura de la planta será menor que la temperatura del ambiente por lo tanto el cultivo no presentara ningún grado de estrés hídrico (Itenfisu *et al.*, 2003).

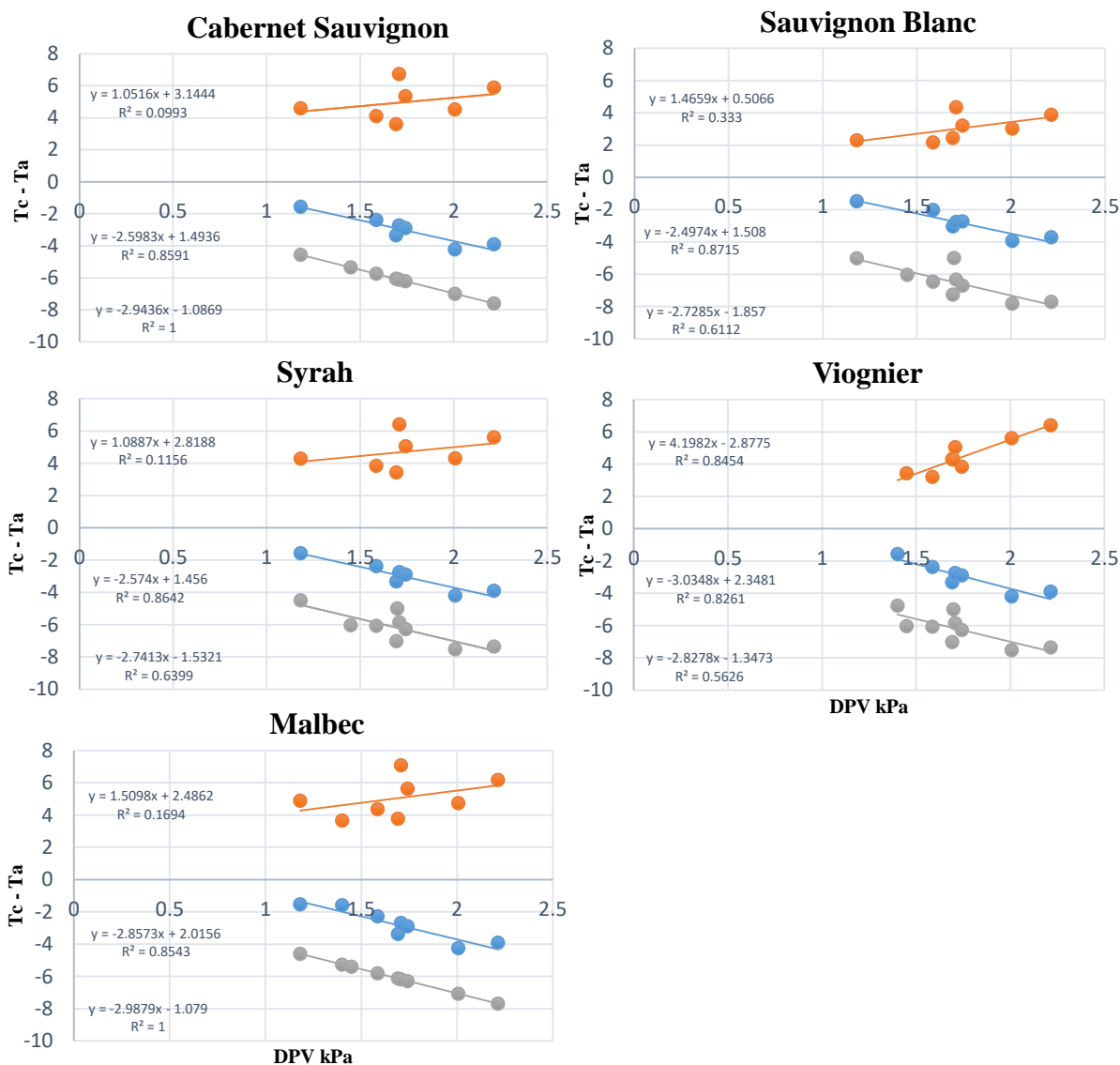


Figura 122. Relación entre la temperatura del dosel del cultivo menos la temperatura del ambiente (Tc-Ta) y el déficit de presión de vapor (DPV) para las variedades Cabernet Sauvignon, Sauvignon Blanc, Syrah, Viognier y Malbec. La línea azul representa la diferencia de Tc-Ta respecto al DPV. La línea naranja representa el límite superior bajo estrés hídrico del cultivo (UL). La línea gris representa el límite inferior sin estrés hídrico del cultivo (LL).

La variedad Viognier presenta una intersección máxima en el UL de 6.40°C cuando el DPV es de 2.25 kPa y una pendiente más pronunciada, tolerando un grado centígrado más de temperatura por encima de la temperatura del ambiente que el resto de las variedades, por lo que se determinó que en cultivar Viognier presenta un alto grado de control estomático, respondiendo en mayor medida a los cambios de DPV, reduciendo cualquier aumento de la transpiración y preservando su grado de turgencia por un tiempo mayor que el resto de las variedades en estudio, catalogándose como una variedad con un comportamiento isohídrico.

La respuesta de las variedades que presentan un comportamiento isohídrico se asocia a mayores niveles de ácido abscísico en la sabia del xilema (Soar *et al.*, 2006), a respuesta hidráulicas y señales hormonales (Tardieu, 1998).

La clasificación del comportamiento isohídrico y anisohídrico de las variedades se da a partir de las condiciones meteoroclimáticas de la zona, la humedad en el suelo y ambiente, además de considerar el tipo de suelo y la historia de la variedad en estudio (Hugalde y Vila, 2014).

Posteriormente a la determinación de los límites mínimos y máximos de estrés del cultivo y a la estimación de la diferencia entre la temperatura del cultivo y del ambiente, se prosigue a la determinación del CWSI utilizando la ecuación descrita en la Figura 116. Una vez determinado el CWSI para cada una de las variedades y meses estudiados se generó una curva de estrés hídrico del cultivo para cada varietal a lo largo del tiempo (Figura 123).

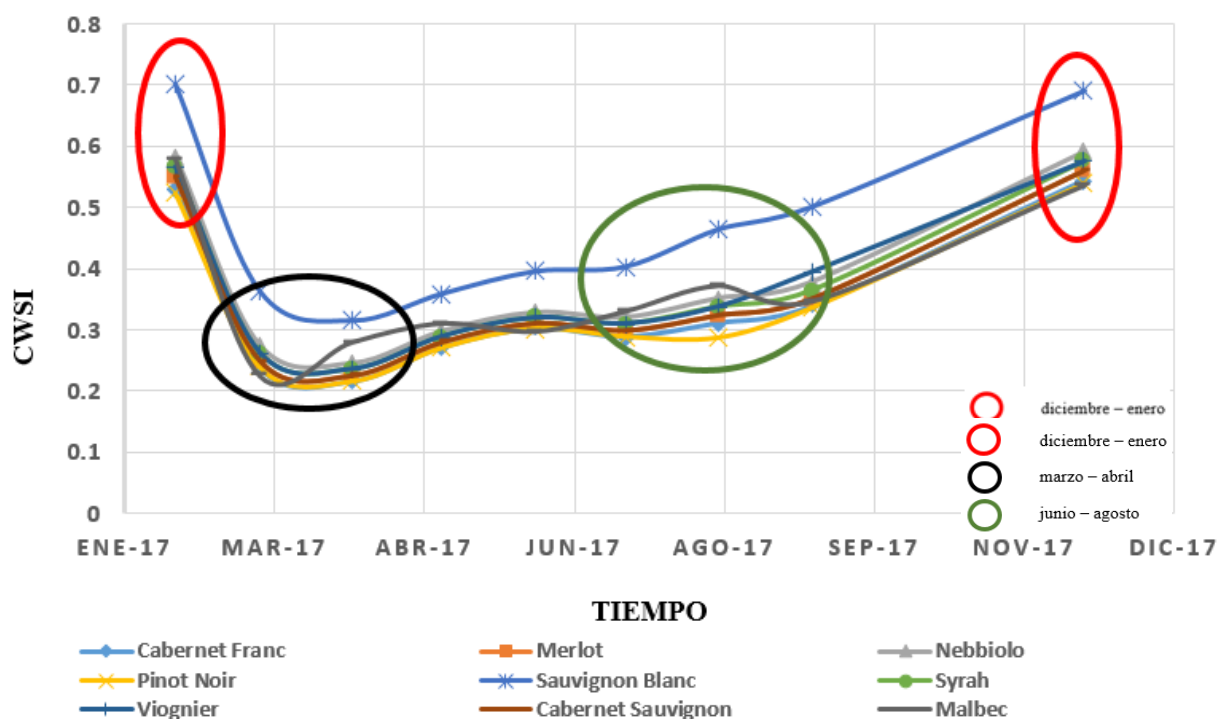


Figura 123. Variabilidad del estrés hídrico del cultivo caracterizado por variedades de vid en un ciclo productivo enero-diciembre 2017.

La figura 123 describe el comportamiento del estrés hídrico del cultivo para las nueve variedades en análisis a lo largo de un año de estudio (enero-diciembre 2017).

Se perciben variaciones en el comportamiento de las variedades para el CWSI, por lo tanto, se infiere que la respuesta estomática varía con respecto a las variedades en estudio y presenta diferente sensibilidad entre los estados fenológicos del cultivo.

El cultivo de Sauvignon Blanc fue el que presentó un mayor grado de estrés hídrico a lo largo del tiempo de estudio, alcanzando valores de 0.1 CWSI por encima del resto de las variedades analizadas a pesar de recibir el mismo plan de riego y labores agrícolas. Sauvignon Blanc fue catalogada en el presente estudio como una variedad con comportamiento anisohídrico, atribuyéndose a la carencia de control estomático, lo que se respalda al observar un mayor grado de estrés significativo con respecto al resto de las variedades.

La variedad Malbec mostró un ligero comportamiento anómalo, al presentar un incremento en el estrés hídrico en el mes de marzo, un decaimiento en el mes de junio y nuevamente un incremento en el mes de agosto, mientras que el resto de las variedades se comportan de manera inversa.

Las variedades Cabernet Franc, Syrah, Merlot, Viognier, Nebbiolo, Cabernet Sauvignon y Pinot Noir, mostraron un comportamiento similar bajo el mismo grado de estrés hídrico, lo anterior puede atribuirse a que el índice de área foliar y la resistencia del dosel al flujo de agua estimados a partir de las ecuaciones propuestas en el manual #56 de la FAO se comportaron muy similar.

El CWSI sigue un patrón cíclico que está en sincronía con eventos de precipitación o irrigación, por lo que la reacción del CWSI seguido de eventos hídricos es caer a un valor mínimo, y conforme la reserva hídrica se comienza a agotar el valor del CWSI comienza a incrementarse, concluyendo que la tasa de incremento de CWSI entre riegos está directamente relacionado con la demanda evaporativa de la atmósfera y la etapa fenológica de las plantas e inversamente relacionado con la disponibilidad de agua almacenada en el suelo (Jackson *et al.*, 1981)

En la figura 123 se observan zonas de interés remarcadas en diferentes tonos, la zona marcada de color rojo muestra el grado de estrés hídrico del cultivo para los meses de diciembre y enero, identificando valores de CWSI de 0.7 para la variedad de Sauvignon Blanc y el resto de las variedades en estudio presentan valores cercanos a 0.6, durante éste periodo de estudio se encuentra el mayor grado de estrés hídrico del cultivo de vid, el cual coincide con el periodo de senescencia y reposo invernal de la planta.

Durante los meses de marzo y abril (zona de color negro) se observa el menor grado de estrés hídrico del cultivo, el cual se presenta durante el periodo de brotación de las nuevas ramas que conformarán la canopia de la vid. En este periodo los riegos son constantes y prolongados con el objetivo de proveer a la planta los requerimientos hídricos para una sana brotación sin limitantes, por lo que no hay presencia de déficit hídrico en el suelo. Se observan valores de CWSI de 0.2 para todas las variedades en estudio excepto para Sauvignon Blanc (0.31).

Seguidamente al periodo de carencia de estrés hídrico del cultivo se comienza a presentar un incremento en los valores de CWSI, se presenta un estrés medio alcanzando valores de CWSI de 0.3 a 0.35 exceptuando a Sauvignon Blanc (0.46) durante el mes de junio, a lo largo de este mes el fruto de vid se encuentra en el periodo de cuajado, por lo que el grado de estrés hídrico debe de ser mínimo, para permitir el apropiado desarrollo de la baya.

El nivel de estrés continuó incrementando durante el mes de julio y agosto, meses en donde el fruto de vid se encuentra en el periodo de envero, durante este periodo de tiempo la planta debe de presentar un grado de estrés moderado, el cual permite la concentración de azúcares, ácidos, color y condiciones organolépticas favorables que permiten la obtención de un vino de calidad.

Para el periodo de brotación y floración del cultivo de vid en la zona productiva se realizó un monitoreo del estrés hídrico de las diferentes variedades en producción.

La Figura 124 muestra la variabilidad del estrés hídrico de ocho variedades productivas en la zona de estudio durante un mes y medio (10 de abril - 25 de mayo), se observa un comportamiento similar en siete de ocho variedades a excepción de la variedad Nebbiolo, ésta muestra una conducta anómala respecto al resto de las variedades, presentando un menor grado de estrés hídrico, pudiéndose atribuir a que el área foliar de la variedad presentaba menor desarrollo que el resto de las variedades, por lo tanto demandó menos recurso hídrico del disponible, logrando mantener una turgencia durante todo el periodo de estudio.

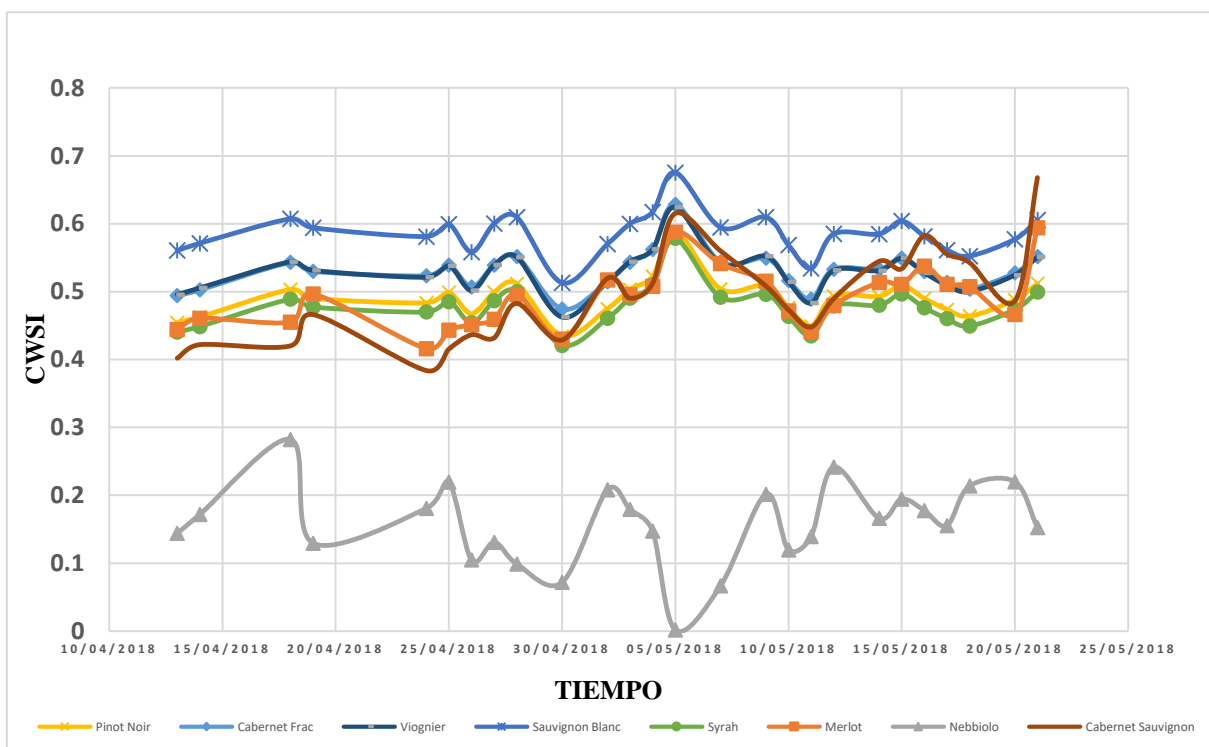


Figura 124. Variabilidad del estado hídrico de las variedades productivas en el periodo de abril a mayo del 2018.

La variedad Sauvignon Blanc fue quien presentó un mayor grado de estrés hídrico durante el periodo en estudio, lo anterior puede atribuirse al comportamiento anisohídrico de la variedad.

Los valores de CWSI más bajos visualizados en la distribución a lo largo del tiempo de análisis corresponden a días en los que se presentaron eventos de precipitación y riegos por periodos cortos y caudales bajos, logrando reducir ligeramente el grado de estrés hídrico del cultivo.

6.3 Relación de CWSI y el potencial hídrico del suelo

El Índice de Estrés Hídrico del Cultivo se encuentra directamente relacionado con las diferentes etapas de desarrollo del cultivo, las condiciones ambientales y con las características fisicoquímicas del suelo, como el potencial hídrico del suelo (CATIE, 1982).

Diversas fuerzas actúan sobre el agua presente en el suelo mostrando la capacidad de éste de retener humedad ejerciendo fuerzas que disminuyen la disponibilidad del recurso hídrico a la planta, el efecto combinado de éstas fuerzas se conoce como potencial hídrico. El agua es retenida por adsorción en la superficie de las partículas de suelo y por capilaridad en los poros.

La raíz de una planta al extraer agua del suelo debe de vencer el potencial hídrico del mismo, y con forme se extrae mayor cantidad de agua del suelo se aumenta el potencial de la restante, hasta que el suelo ejerce una fuerza tan grande, que la raíz de la planta no es capaz de seguir absorbiendo agua del suelo (Olalla *et al.*, 2005; Thompson y Troeh, 1988).

Para determinar el potencial hídrico del suelo se establecieron puntos de muestreo en la zona de estudio durante un mes y medio (10 de abril - 25 de mayo 2018), se utilizó el sensor Watermark digital de medición de humedad del suelo con lecturas instantáneas. El equipo Watermark es un sensor de matriz granular con sensores de resistencia eléctrica, formados por una matriz y dos electrodos. Su funcionamiento se basa en equilibrar el agua presente en la matriz, con la presente en el suelo, la resistencia eléctrica entre los electrodos es quien manda la señal del potencial hídrico al lector (Spectrum Technologies. Inc. 2008).

Las mediciones se realizaron diariamente durante el horario de 9:00 am a 10:00am en puntos aleatorios en los distintos tipos de suelo presentes en la zona de estudio.

Las figuras 125 – 127 muestran la relación existente entre el índice de estrés hídrico del cultivo de la vid (CWSI) por variedad respecto al potencial hídrico (kPa) de los diferentes tipos de suelo en estudio.

La relación del CWSI respecto al potencial hídrico del suelo que muestra un mayor grado de coeficiente de determinación es la variedad Sauvignon Blanc en suelo franco arcilloso y la variedad Malbec en suelo franco arcillo arenoso, alcanzando valores de R^2 de 0.9963 y 0.9865, respectivamente, para ambas variedades se presentan valores de estrés hídrico del cultivo de 0.45 y 0.5 de CWSI cuando el potencial hídrico del suelo alcanza los 23 kPa y desciende el valor de CWSI hasta 0.4 con valores de 10 y 2 kPa, respectivamente, lo anterior se puede atribuir a que ambas zona de interés presentan suelo con contenido de arcillas, mismas que logran retener mayor grado de humedad, no obstante, su disponibilidad se ve afectada cuando llegan a un contenido del 11% de humedad (Figura 57-58), viéndose afectado el cultivo de vid al presentarse más rápido el estado de estrés hídrico.

La variedad Merlot en suelo franco, muestra un comportamiento lineal medio con un valor de R^2 de 0.6483, en el gráfico de la variedad en estudio se observa un valor mínimo de 0.36 de CWSI a un potencial hídrico del suelo de 2 kPa y a medida que el potencial hídrico incrementa el valor de CWSI lo hace también, hasta alcanzar un valor máximo de CWSI de 0.46 para un potencial hídrico del suelo de 36 kPa, lo que determina que la variedad Merlot cultivada en un suelo franco presenta una mayor tolerancia a la deficiencia hídrica del suelo, ya que este presenta un mayor grado de retención de humedad, misma que es aprovechada por la planta cuando ésta lo demanda.

La variedad Merlot en suelo franco arenoso, es quien muestra un menor grado de ajuste de las variables en estudio, presentado valores de R^2 de 0.5411, para el resto de los modelos se presentó un buen ajuste al relacionar la variable CWSI con el potencial hídrico del suelo, con valores que van desde 0.6145 hasta 0.9963.

Para el caso del conjunto de variedades presentadas en la Figura 125 se muestra que en los cultivares Viognier y Cabernet Franc establecidos en suelo franco se analizó su potencial hídrico a partir de un periodo de riego, por lo que la primera lectura del potencial hídrico del suelo es menor a 5 kPa, sin embargo, presentan un grado de estrés hídrico de 0.3 CWSI, ya que el riego realizado fue por un periodo corto y no se logró compensar todo el grado de estrés hídrico que presentaban los cultivares.

Las variedades presentes en suelo franco se analizaron durante un periodo de más días que el resto de las variedades, logrando observar una línea de tendencia más prolongada, sin embargo, el modelo analizado se ajustó en un 70% para los cuatro cultivares en estudio. La variedad Syrah en suelo franco arenoso se analizó por un periodo de tiempo muy corto, en el cual se determinó un valor de R^2 de 0.7085, logrando un ajuste promedio en el modelo en estudio, alcanzando un CWSI de 0.37 con un potencial hídrico del suelo de 16.5 kPa.

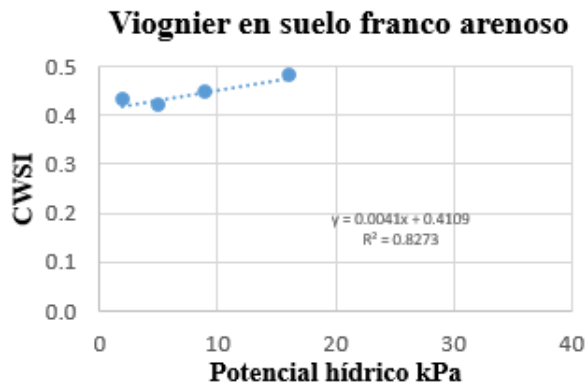
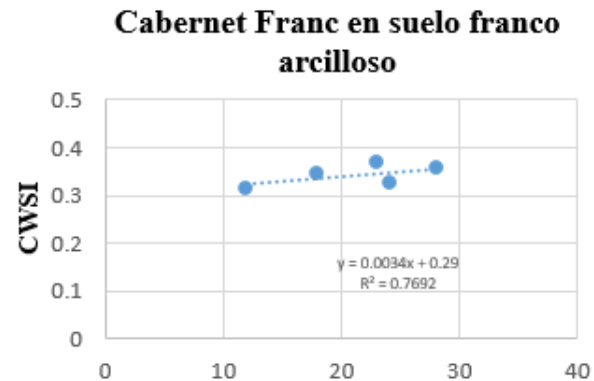
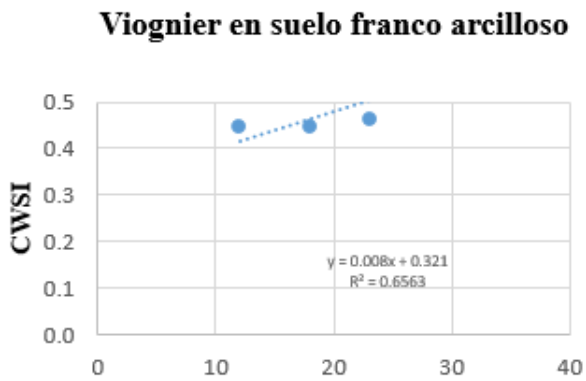
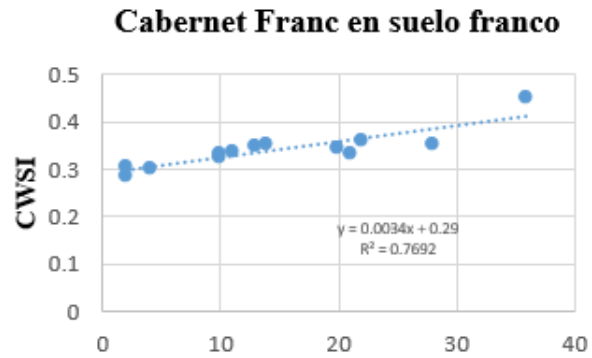
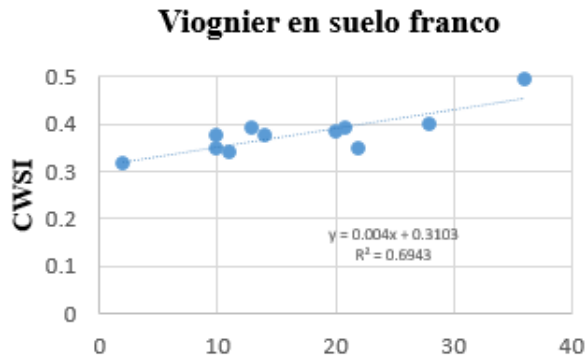


Figura 125. Relación del índice de estrés hídrico del cultivo de la vid por variedad respecto al potencial hídrico (kPa) de los diferentes tipos de suelo presentes en la zona de estudio. Variedades en estudio: Viognier y Cabernet Franc.

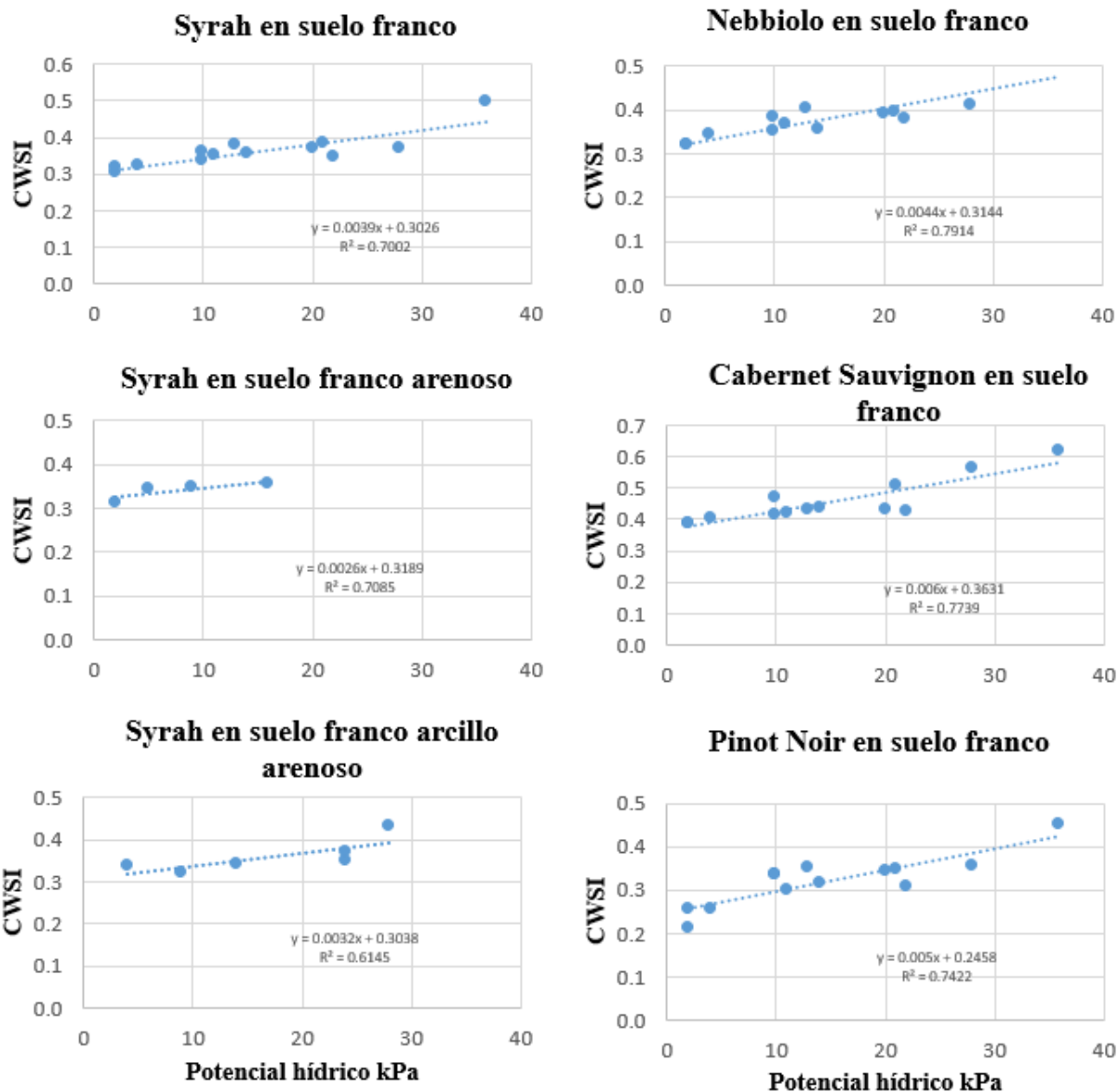


Figura 126. Relación del índice de estrés hídrico del cultivo de la vid por variedad respecto al potencial hídrico (kPa) de los diferentes tipos de suelo presentes en la zona de estudio. Variedades en estudio: Syrah, Nebbiolo, Cabernet Sauvignon, Pinot Noir.

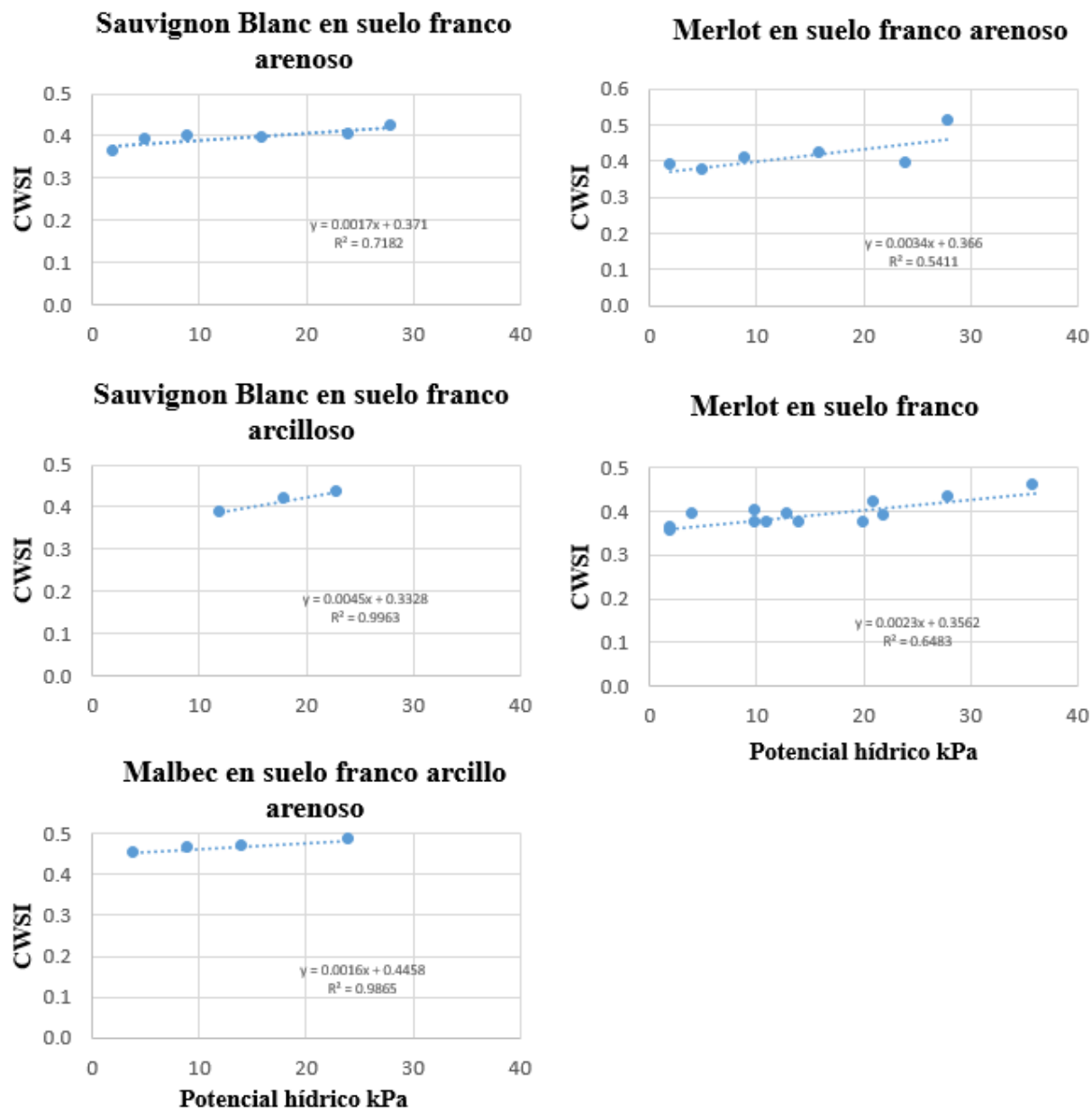


Figura 127. Relación del índice de estrés hídrico del cultivo de la vid por variedad respecto al potencial hídrico (kPa) de los diferentes tipos de suelo presentes en la zona de estudio. Variedades en estudio: Sauvignon Blanc, Malbec y Merlot.

En general se observa que el grado de estrés hídrico del cultivo incrementa conforme el potencial hídrico del suelo en mayor, es decir a menor disponibilidad de humedad en el suelo la planta se ve afectada directamente, mostrando un mayor grado de estrés hídrico, alcanzando valores de CWSI de hasta 0.65 para la variedad Cabernet Sauvignon en suelo franco con un valor de 36.5 kPa.

6.4 Conclusiones del capítulo 6

- ❖ El CWSI desarrollado por Jackson en 1981 y modificado por Idso en 1981 se fundamenta en la relación lineal entre el déficit de presión de vapor y la diferencia de temperatura de la canopia del cultivo y la temperatura del ambiente. A partir de la relación entre el DPV y $T_c - T_a$ se logran determinar los límites máximos y mínimos de estrés para la vegetación en estudio, una vez determinado el UL y el LL se consigue estimar el grado de estrés hídrico que presenta el cultivo.
- ❖ El modelo empírico con base en un balance de energía, permitió estimar la diferencia de temperatura entre la canopia del cultivo y el ambiente, al mostrar un valor de R^2 por encima de 0.80, catalogándose como un modelo confiable, ya que se ajustan bastante bien a las variables en estudio. Se confirma que los valores de $T_c - T_a$ varían con respecto al DPV, ya que la temperatura del cultivo se incrementa a medida que el DPV disminuye.
- ❖ Los límites máximos y mínimos estimados para cada variedad en estudio mostraron un comportamiento similar con un valor de R^2 por encima de 0.50 hasta alcanzar una relación completamente lineal con un valor de R^2 de 1 para las variedades Cabernet Sauvignon y Malbec. La variedad Sauvignon Blanc mostró una pendiente más suave que el resto de las variedades, obteniendo un valor de UL de 4°C para un DPV de 2.5 kPa, catalogándose como la variedad que muestra un estrés hídrico anticipado al resto de los varietales, por lo que se determina como una variedad con un comportamiento anisohídrico. La variedad Viognier presentó un valor de UL de 6.4°C para un DPV de 2.5 kPa con una pendiente pronunciada, catalogándose en este estudio como un varietal con comportamiento isohídrico, ya que muestra un control estomático, logrando reducir el grado de transpiración el cual se observa al presentar un mayor grado de temperatura de la canopia del cultivo con respecto a la temperatura del ambiente.
- ❖ El CWSI determinado durante el periodo de enero a diciembre del 2017 presentó un comportamiento cíclico que está en sincronía con eventos de precipitación o irrigación, condiciones ambientales y etapas fenológicas del cultivo en estudio. Se logró identificar las zonas con mayor y menor grado de estrés hídrico a lo largo del tiempo de estudio, las cuales presentan una relación directa con los periodos relevantes del desarrollo del cultivo: reposo invernal, brotación y periodo de cuajado.
- ❖ El método utilizado del CWSI basado en el balance de energía, es un método eficiente que se puede usar para la determinación de la curva de crecimiento del cultivo y en la programación de riegos.

- ❖ EL CWSI está directamente relacionado con las etapas fenológicas del cultivo, condiciones ambientales y con las características fisicoquímicas del suelo. Ya que el potencial hídrico del suelo es una respuesta del comportamiento fisicoquímico del agua en el suelo, se evalúa y se determina que éste afecta directamente el estado hídrico de la vegetación, con una relación entre el CWSI y el potencial hídrico con un valor de R^2 por encima 0.50 hasta valores de 0.99, presentando una relación lineal y mostrando que a medida que el potencial hídrico del suelo incrementa el estrés hídrico del cultivo es mayor.
- ❖ Se recomienda realizar un segundo estudio analizando la temperatura del cultivo con el uso de termografía infrarroja, utilizar datos de la estación meteorológica interna, además de colocar sensores de humedad representativos que permitan conocer a profundidad el comportamiento del agua en los distintos tipos de suelo presentes en la zona de estudio.
- ❖ Al utilizar imágenes térmicas se recomienda realizar el análisis en tres tiempos a lo largo del día para evaluar el comportamiento conforme aumenta la temperatura ambiental.
- ❖ La relación entre el CWSI y el potencial hídrico del suelo confirman la capacidad del de Índice de Estrés Hídrico del Cultivo de evaluar el estado hídrico de los varietales productivos de la zona de estudio.

6.5 Abreviaciones del capítulo 6

CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
CWSI	Índice de Estrés Hídrico del Cultivo
DPV	Déficit de Presión de Vapor
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
LL	Límite inferior, nulo estrés hídrico
T _a	Temperatura del ambiente °C
T _c	Temperatura del dosel del cultivo °C
r _a	Resistencia aerodinámica sec m ⁻¹
I _c	Coefficiente de intercepción de la radiación
R _n	Radiación neta W m ⁻²
ρ _a	Densidad del aire kg/m ⁻³
C _p	Calor específico del aire J kg °C
Δ	Pendiente de la curva de la presión de vapor a la temperatura del aire kPa °C
γ	Constante psicométrica kPa °C
r _c	Resistencia del dosel al flujo de vapor de agua sec m ⁻¹
r _a	Resistencia aerodinámica sec m ⁻¹
e _s e _a	Déficit de presión de vapor kPa
UL	Límite superior, máximo estrés hídrico
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado

6.6 Bibliografía del capítulo 6

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma (IT). 280 pp.
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 1982. Agroambiente. Costa Rica (CR). 20 pp.
- Chaves, M., Pereira, I., Maroco, J. 2003. Understanding plant response to drought-from genes to the whole plant. *Functional plant biology* 30:239-264. 27 pp.
- Chaves, M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J., Santos, T., Regalado, A., Drigues, M., Lopes, C. 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of botany*. 105:661-676. 20 pp.
- Domec, J., Johnson, D. 2012. Does homeostasis or disturbance of homeostasis in minimum leaf water potential explain the isohydric versus anisohydric behaviour of *Vitis vinifera* L. cultivars? *Tree physiology* 00, 1-4. Commentary. 10 pp.
- Erdem, Y., Seherali S., Erdem T., Kenar, D. 2005. "Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.)". *Remote Sensing of Environment*. 30: 195-202. 8 pp.
- FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos #56 Modificado. Roma (IT). ISBN 92-5-304219-2. 322 pp.
- Hargreaves, G. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120(6), 1132-1139. 15 pp.
- Idso, S., Jackson, R., Pinter, J., Reginato, R., Hatfield, J. 1981. Normalizing the stressdegree day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55. 12 pp.
- Idso, S. 1982. Non-water-stressed-baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Estados Unidos (US). *Agricultural Meteorology*, 27(1982) 59-70. 12 pp.
- Idso, S., Reginato, R., Clawson, K., Anderson, M. 1984. On the stability of non-water-stressed-baselines. Estados Unidos (EU). *Agricultural and Forest Meteorology*, 32 (1984) 177 – 182. 6 pp.
- Itenfisu, D., Elliott, L., Allen, R., Walter, I. 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129(6), 440-448. 9 pp.

- Jackson, R.D. Idso, S.B. Reginato, R.J. Printer, P.J. 1988. Canopy temperature as a crop water-stress indicator. *Water Resour Res* 17, 1133-1138
- Jackson, R., Idso, S., Reginato, R., Pinter, J. 1981. Canopy temperatura as a Crop Water Stress Indicator. *Water Resources Research*, 17 (4), 1133–1138. 13 pp.
- Jackson, R., Reginato, R., Idso, S. 1977. Wheat canopy temperature: A practical toolfor evaluating water requirements. *Water Resources Research* 13: 651–656. 14 pp.
- López, R., Arteaga, R., Vázquez, M., López, I., Sánchez, I. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Campo experimental Inifap. México (MX)*. 16 pp.
- Lovisollo, C., Hartung, W., Schubert, A. 2002. Whole-plant hydraulic conductance and root to shoot flow of ABA acid are independently affected by water stress in grapevines. *Functional plant biology* 29:1349-1356. 8 pp.
- Matese, A., Baraldi, R., Berton, A., Cesaraccio, C., Filippo, S., Duce, Pierpaolo, Facini, O., Giuseppe, M., Piga, A., Zaldei, A. 2018. Estimation of Water Stress in Grapevine Using Proximal and Remote Sensing Methods. *Francia (FR) Remote Sens.* 10,114. 16 pp.
- Monteith J. 1995. A reinterpretation of stomatal conductance to humidity. *Plant. Plant Cell Environ.*, 18, pp. 357–364.
- Olalla, F., López, P., Calera, A., 2005. *Agua y Agronomía. México (MX)*. ISBN: 84-8476-246-7. 603 pp.
- Potters, G., Pasternak, T., Guisez, Y., Palme, K., Jansen, M. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? *Trends Plant Sci.* 12(3), 99-105.
- Salisbury, F., Parke, R. 1968. *Las plantas vasculares: forma y función. México (mx)*. 1ª edición. 198 pp.
- Sepúlveda, D., Ingra, B., Bardeen, M., Zúñiga, M., Ortega, S., Poblete, C. 2016. Selecting Canopy Zones and Thresholding Approaches to Assess Grapevine Water Status by Using Aerial and Ground-Based Thermal Imaging. *Remote Sens.* 8, 822. Chile (CL). 17 pp.
- Shao, H., Chu, C., Zhao, C. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C.R. Biol.* 331, 215-225.
- Soar, C., Speirs, J. Maffel, S., Penrose, A., MCarthy, M., Loveys, B. 2006. Grape vine varieties Shiraz and Grenache differ in their stomatal response to VPD: apparent links with ABA physiology and gene expression in leaf tissue. *Australian Journal of Grape and Wine Research*; 12:2-12. 18 pp.

- Spectrum Technologies. Inc. 2008. Watermark Soil Moisture Sensor. Catalog #6450. [en línea] [consultado 05 de abril del 2018] Disponible en el World Wide Web: <<https://envcoglobal.com/files/docs/6450-watermark-manual-20080.pdf>>
- Taghvaeian, S., Cháves, J., Hansen, N. 2012. Infrared Thermometry to Tstimate Crop Water Stress IndeX and Water use of Irrigation Maize in Northeastern Colorado. *Remote Sens.* 3619-3637. Estados Unidos (EU). ISSN 2070-4292 19 pp.
- Tardieu, F., Simonneau, T. 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany* 49, 419-432. 14 pp.
- Thompson, L., Troeh, F. 1988. *Los suelos y su fertilidad*. 4ta edición. España (ES). ISBN: 84-291-1041-0 657 pp.
- Vargas, J. 2015. Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá. [Tesis Maestría: Magister en Ingeniería Agrícola] Colombia (CO): Universidad Nacional de Colombia. 134 pp.

CONCLUSIONES

- ❖ Para realizar satisfactoriamente la estimación del estrés hídrico de *Vitis vinifera* en la zona de viñedos del municipio de San Luis Potosí, se trabajó con el índice NDVI que permitió conocer el estado de sanidad de la vegetación, el grado de humedad presente en el suelo y en la planta de vid fue estimado con el uso del índice NDWI, el estrés hídrico de las variedades en estudio se obtuvo al trabajar con el índice CWSI y el nivel de evapotranspiración de la zona de interés se determinó a partir del modelo propuesto por la FAO (Penman-Monteith) en el manual #56.
- ❖ Con la descripción de la relación agua, suelo, planta y atmósfera se obtuvo un amplio panorama de las condiciones presentes en la zona de estudio y de los recursos con lo que cuenta el sector agrícola, además de identificar zonas de mejora como lo es la nutrición del suelo, monitoreo de la calidad de agua para riego y variedades con mayor susceptibilidad al estrés hídrico, plagas y enfermedades.
- ❖ Los resultados obtenidos de la caracterización del suelo de la zona en estudio mostraron una variabilidad espacial en función de las variedades de vid en producción y del tipo de suelo presente a lo largo de las fincas, en donde se obtuvo un estado de nutrición de suelo de nivel medio con deficiencia de potasio y magnesio.
- ❖ El suelo de las fincas en estudio se determinó como apto para la producción agrícola al evaluar los parámetros de salinidad, sodicidad y toxicidad. Con respecto a la variable de salinidad se trabajó con la determinación del PSI y se encontraron valores por debajo del 15%, al analizar la variable de sodicidad con el parámetro de CSR se determinaron concentraciones menores a 1.25 meq/L lo que estableció que no hay presencia ni riesgos de suelos sódicos, la toxicidad a cloruros fue la última variable analizada y se encontraron resultados que descartan la toxicidad, ya que la concentración del ion cloruro en los suelos es menor a los 25 meq/L, concentración límite para el cultivo de vid.
- ❖ La calidad del agua de pozo fue clasificada como un agua apta para riegos con respecto a los parámetros de infiltración, el grado de salinidad, sólidos totales disueltos y toxicidad al evaluar la concentración de iones cloro y sodio.
- ❖ Las imágenes multiespectrales tomadas desde un VANT de la zona de estudio, permitieron trabajar el NDVI espacial y temporalmente. De manera que los resultados obtenidos respecto a la resolución espacial cedieron a una interpretación a mayor detalle del estado de turgencia de la vegetación, resultando en la relación que existe entre la vigorosidad de la planta y el grado de estrés hídrico del cultivo.

- ❖ La estimación de la evapotranspiración del cultivo se determinó satisfactoriamente a partir del NDVI obteniendo un R^2 de 0.9378, valor que señala un alto grado de correlación entre la $ET_{c_{aj}}$ y el NDVI, de manera que se comprueba el supuesto de que, un mayor grado de evapotranspiración muestra un grado mejor de vigorosidad del cultivo y sin presencia de estrés hídrico.
- ❖ El NDWI fue estimado favorablemente a partir de las imágenes satelitales Landsat 8-OLI, de manera que se obtuvo la distribución de la humedad del suelo y la vegetación a lo largo de 6 meses de estudio, cuyas condiciones se encuentran ligadas directamente al índice de vegetación del cultivo, ya que, a mayor presencia de humedad en el suelo, la vigorosidad de la vegetación será mayor, viéndose reflejada al analizar el NDVI.
- ❖ Al determinar el estado hídrico de la vid con el uso del CWSI se estudió la relación directa entre las etapas fenológicas del cultivo, las condiciones ambientales y el potencial hídrico del suelo.
- ❖ En cuanto a la correlación del CWSI y el grado de humedad del suelo (potencial hídrico) se aprueba la relación directa que existe entre ambas variables al obtener valores de coeficiente de R^2 por encima 0.50 hasta alcanzar valores de 0.99, según la variedad y tipo de suelo en estudio. De manera que el estatus hídrico del suelo afecta directamente el estado hídrico de la vegetación.
- ❖ El uso de la percepción remota a partir de un modelo de distribución y monitoreo geoespacial con información de imágenes multiespectrales, hizo frente a la estimación y estudio de los índices de vegetación, humedad y estrés hídrico de *Vitis vinifera* a lo largo de su ciclo vegetativo y reproductivo en la zona de viñedos del municipio de San Luis Potosí.

BIBLIOGRAFÍA

- Agrolab. 2005. Guía de referencia para la interpretación: análisis de suelos Agrolab. Acreditado ISO 17025:2005. México (MX). 15 pp.
- Aguilar, H., Mora, R., Vargas, C. 2014. Atmospheric correction methodology for Aster, Rapideye, Spot 2 and Landsat 8 images with ENVI Flaash module software. Geográfica de America Central. N°53 Costa Rica (CR) ISSN 1011-48X. 21 pp.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma (IT). 280 pp.
- Amezquita, E. 1988. Establecimiento de las zonas oxidadas y reducidas en suelos sumergidos. In: Primer seminario de azufre. S. C. C. S. Colombia (CO). 43 pp.
- Ararat, A. 1996. Evaluación del estado de los nutrientes en los suelos del Departamento de Córdoba. In: Temas Agrarios. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad de Córdoba. Colombia (CO). 45 pp.
- ArcGIS for Desktop. 2016. Funciones de raster: Función Remuestrear. [en línea] [consultado 13 de febrero del 2018] Disponible en el World Wide Web: <<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/resample-function.htm>>
- ArcGIS. 2017. Introducción a SIG. [en línea] [consultado 28 de mayo del 2018] Disponible en el World Wide Web: <<http://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n000000t000000.htm>>
- ArcGIS Desktop. 2018. Conjunto de herramientas Procesamiento de raster: Remuestrear. [en línea] [consultado 12 de febrero del 2018] Disponible en el World Wide Web: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/data-management/resample.htm#S_GUID-42DF67C5-47AE-4853-A36D-4BBA8D90A7C1>
- ArcGIS Pro. 2018. Conceptos del conjunto de herramientas Interpolación de raster. Estados Unidos (EU). [en línea] [consultado 18 de noviembre del 2017] Disponible en el *World Wide Web*: <<https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>>
- Ariel, M., Campanella, O., 200. AP-SIG: Un SIG con funciones específicas para Agricultura de Precisión. Argentina (AR). 5 pp.
- Arteaga, R., Ángeles, V., Vázquez, M. 2011. Programa cropwat para la planeación y manejo del recurso hídrico. México (MX). Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol. 2. 17 pp.

- Asensio M. 2000. Caracterización de variedades de *Vitis vinifera* L. cultivadas en Extremadura, mediante estudios morfológicos, agronómicos y bioquímicos. 397 pp.
- Ayers, R. 1989. Water quality for agriculture. United States (US). ISBN 92-5-102263-1 [en línea] [consultado 02 de noviembre del 2017] Disponible en el *World Wide Web*: <<http://www.fao.org/docrep/003/t0234e/T0234E00.htm#TOC>>
- Ayers, R., Westcot, D. 1994. Water quality for agricultura. FAO. Italia (IT). ISBN 92-5-102263-1. 174 pp.
- Azcón, J., Talón, M. 2000. Fundamentos de Fisiología Vegetal. [en línea] [consultado 03 de julio del 2018] Disponible en el *World Wide Web*: <<http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetalAzcon.pdf>>
- Baeza, P., Lissarrague, J. Sánchez, P. 2007. Fundamentos, Aplicación y Consecuencias del Riego en la Vid. España (ES). 45 pp.
- Baeza, P., Sánchez de Miguel, P., Centeno, A., Junquera, P., Linares, R., Lissarrague, J. 2007. Water relations between leaf water potential, photosynthesis and agronomic vine response as a tool for establishing thresholds in irrigation scheduling. *Scientia Horticulturae* 114: 151-158
- Barrientos, A., del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., Rossi, C. 2016. Vehículos aéreos no tripulados para y uso civil. Tecnología y aplicaciones. España (ES). 29 pp.
- Berk, A., Anderson, G., Acharya, P., Chetwynd, J., Bernstein, L., Shettle, E., Matthew, M., Adler-Golden, S. (2000). MODTRAN4 user's manual.
- Bessis, R., Adrián. M. 2000. Alimentation hydrique de la vigne: un facteur de l'expression du terroir. *Progrés Agricole et Viticole*. Vol. 117. N° 15-16, 345-350. Francia (FR). 11 pp.
- Best, S., Zamora, I., 2008. Tecnologías aplicables en la Agricultura de Precisión. 1ª ed. Chile (CH). SBN 978-956-7874-90-3. 102 pp.
- Best, S., Gatica, G., León. L. 2009. Development of an assessment model of water stress of vineyard var. Merlot, based on the use of infrared thermography. *Proceedings of the 8th Fruit, Nut and Vegetable Production Engineering Symposium*, Chile (CH). 15 pp.
- Best, S., León, L. Méndez, A., Flores, F., Aguilera, H. 2014. Adopción y Desarrollo de tecnologías en Agricultura de Precisión. *Boletín N° 3, Progap-INIA*, Chile (CH). 95 pp.
- Bellvert, J., Girona, J., 2012. The use of multispectral and thermal images as a tool for irrigation scheduling in vineyards. España (ES). CIHEAM. Serie B. Etudes et Recherches, n° 67. 131-137 pp.

- Bellvert, J., Zarco, P., Girona, J., Fereres, E. 2014. Mapping crop water stress index in a “Pinot-noir” vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*. 16 pp.
- Bernáldez, C., Olguín, H., 2003. Breve Historia del Vino en México (parte I): de la época prehispánica a principios de la Revolución. Universidad Autónoma del Estado de México. Revista Virtual "Culinaria". No. 4.
- Bernier, R., Alfaro, M., 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Chile(CL) ISSN 0717-4829. 46 pp.
- Botella, A., Muñoz, A., Olivella, R., Olmedillas, J., Rodríguez, J. 2011. Introducción a los sistemas de información geográfica y geotelemática. España (ES). ISBN: 978-84-9788-933-9. 346 pp.
- Boyer, J.S. 1995. Measuring the water status of plants and soils. Academic Press, Inc, Londres. 178 pp.
- Bramley, R. 2009. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application.
- Cabello, F., Rodríguez, I., Muñoz, G., Rubio, C., Benito, A., García, S. La colección de variedades de vid de “El Encín”. Consejería de Economía e Innovación Tecnológica. Madrid (ES). ISBN: 84-451-2411-0 208 pp.
- Calera, A., Campos, I., Garrido, J., 2016. Determinación de las necesidades de agua y de riego mediante estaciones meteorológicas y series temporales de imágenes multiespectrales. España (ES). 20 pp.
- Camacho, A., 2016. Análisis de las estrategias de adaptación a la escasez hídrica de las empresas vitivinícolas del Valle de Guadalupe, B.C. [Tesis Maestría. Administración Integral del Ambiente] México (MX): Centro de Investigaciones Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 118 pp.
- Campos, I., Calera, A., Balbontín, C., Torres, E., González, J., Neale C. 2010. Basal crop coefficient from remote sensing assessment in rain-fed grapes in southeast Spain. España (ES). *Publi*. 352,2012,397-400. 20 pp.
- Cánovas, J., 1986. Calidad agronómica de las aguas de riego. 3ª ed. ISBN 8434101602. 55 pp.
- Castellanos, R., Morales, M. 2016. Análisis crítico sobre la conceptualización de la agricultura de precisión. *Revista Redalyc*. Santiago de Cuba (Cuba) ISSN 1027-2887. Ciencias en su PC, N°2.

- Castellanos, J., Uvalle, J., Aguilar, A. Santelises. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Colección INCAPA. 2ª edición. México (MX).
- Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). 1982. Agroambiente. Costa Rica (CR). 20 pp.
- Chaves, M., Pereira, I., Maroco, J. 2003. Understanding plant response to drought-from genes to the whole plant. *Functional plant biology* 30:239-264. 27 pp.
- Chaves, M., Zarrouk, O., Francisco, R., Costa, J., Santos, T., Regalado, A., Drigues, M., Lopez, C. 2010. Grapevine under deficit irrigation: hints from physiological and molecular data. *Annals of botany*. 105:661-676. 20 pp.
- Chuvienco, E. 2002. Teledetección ambiental. 3ª edición. España (ES). ISBN: 978-84-344-8073-3. 597 pp.
- Coela, R., Tarquí, M., 2017. Evaluación de la demanda de los recursos hídricos en el riego tradicional de la cuenca Azanaques. Bolivia (BO). *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales*. Vol. 4. ISSN: 2518-6868. 12 pp.
- Combatt, E., García, A., Mercado, F. 2004. Efecto del enclamiento y el lavado sobre algunas propiedades químicas de un suelo sulfatado ácido magnésico del valle del río Sinú. Tesis de magíster en suelos. Universidad de Córdoba. Colombia (CO). 167 pp.
- Combatt, E., Jarma, A., Cleves, A., 2008. Efecto del enclamiento de suelos sulfatados ácidos en Córdoba (Colombia) sobre el fruto de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.). Colombia (CO). 173-179 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2005. Percepción remota “Fundamentos de Teledetección Espacial”. México (MX).
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2016. Estadísticas del agua en México. Ed.2016. México (MX) Búsqueda [13 de febrero del 2017] 282 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2016. Atlas del agua en México 2016. México (MX). Búsqueda [12 de febrero del 2017] 140 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2014. Programa Nacional Hídrico 2014-2018. México (MX). Búsqueda [12 de febrero del 2017] 142 pp.
- Corrales, R., Ochoa, V. 2016. Cálculo de Reflectancia en imágenes Landsat OLI-8, sobre la región central de Honduras, mediante software libre SEXTANTE.
- Deloire, A., Carbonneau, A., Wang, Z., Ojeda, H. 2004. Vine and water a short review. *Journal International Des Sciences De La Vigne Et Du Vin* 38 (1): 1-13.

- Del Valle, H. 1992. Prácticas de relación agua-suelo-planta-atmósfera. 1ª edición. México (MX). ISBN 968-884-190-0. 167 pp.
- Dent, D. 1992. Reclamation of axial sulfate soils. Advances in soils sciences. Springer. Ver Land. Estados Unidos (US). 81 pp.
- Dji. ENTERPRISE. 2018. Guía de inicio rápido V1.2P PHANTOM 3 PROFESSIONAL. [en línea] [consultado 30 de julio del 2018] Disponible en el World Wide Web: <https://www.dji.com/es/phantom-3-pro?site=brandsite&from=insite_search>
- Domec, J., Johnson., D. 2012. Does homeostasis or disturbance of homeostasis in minimum leaf water potential explain the isohydric versus anisohydric behaviour of *Vitis vinifera* L. cultivars? Tree physiology 00, 1-4. Commentary. 10 pp.
- Domingo, R., Nortes, P., Egea, G., Torres, R., Pérez Pastor, A. 2005. Utilización de sensores en planta para la programación del riego y uso eficiente del agua en la agricultura. Vida Rural, 217: 42–46.
- Eaton, F., 1950. Significance of carbonates in irrigations waters. Soil Science Vol.69. 127 – 128 pp.
- Echeverria, N. 2010. Evaluación del Índice Vegetativo Diferencial Normalizado (NDVI) para la definición de Unidades de Manejo Diferenciado del Viñedo en la Rioja Alavesa. [Tesis Licenciatura. Ingeniería Agrónomo] España (ES): Universidad Politécnica de Navarra. 81 pp.
- Erdem, Y., Seherali S., Erdem T., Kenar, D. 2005. “Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Scheduling of Bean (*Phaseolus vulgaris* L.)”. Remote Sensing of Environment. 30: 195-202. 8 pp.
- Er-Raki, S., Rodriguez, J., Garatuza, J., Watts, C., Chenhbouni, A. 2013. Determinación of crop evapotranspiration of table grapes in a semi-arid región of Northwest Mexico using multi-spectral vegetation index. Agricultural Water Management 122 (2013) 12-19. México (MX). 8 pp.
- Escuela de Agricultura de la Región Trópico Húmedo (EARTH). 2013. Guía de curso: Propiedades de Suelos del Trópico. Universidad EARTH. Costa Rica (CR). 79 pp.
- Espíndola, R., Pugliese, F., 2008. Fertilización razonada de la vid. Ministerio de Agricultura y Pesca. Argentina (AR). 39 pp.
- Espinoza, L., Slaton, N., Mozaffari, M., 2006. Como interpretar los resultados de los análisis de suelos. University of Arkansas System. Estados Unidos (EU) FSA.2118SP. 4 pp.

- Fabio, A., Marano, R., 2014. Rehabilitación de suelos con impedimentos físicos de uso hortícola degradados por riego con aguas bicarbonatadas sódicas. [Tesis Maestría. Cultivos Intensivos] Argentina (AG): Universidad Nacional de Litoral. Facultad de Ciencias Agrarias. 100 pp.
- Fernández, C., Combatt, E., Rivera, H., 2011. Algunas características de la estomofauna de suelos sulfatados ácidos en Córdoba, Colombia. Colombia (CO). ISSN 2007-0934. 10 pp.
- Ferreyra, R., Selles, G., Peralta, J., Burgos, L., Valenzuela, J. 2002. Efectos de la restricción del riego en distintos períodos de desarrollo de la vid CV. Cabernet Sauvignon sobre producción y calidad del vino. Agricultura Técnica, Chile. 62(2): 406-417.
- Fitzpatrick, R.; Fritsch, E. y Self, P. 1993. Australia's unique saline acid sulfate soils associated with dryland salinity'. In Bush, R. (ed.), Proceedings of the First National Conference on Acid Sulfate Soils, Australia (AU). 41-56 pp.
- Flores, T. 2015. Evaluación de variedades de vid (*Vitis vinifera*) y fuentes de fertilización en producción de hoja para consumo humano. [Tesis Maestría. Ciencias en Producción Agrícola.] Nuevo León (MX): Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Agronomía. 65 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1993. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. ISBN 92-5-303360-6. Italia (IT).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2002. Cumbre mundial sobre la alimentación, cinco años después. Página en línea oficial FAO [En línea]
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos #56 Modificado. Roma (IT). ISBN 92-5-304219-2. 322 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Foro de expertos de alto nivel. Italia (IT). 4 pp.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2013. FAO: Grape. Post-harvest operations.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2015. 2050: La escasez de agua en varias zonas del mundo amenaza la seguridad alimentaria y los medios de subsistencia.
- Gao, B. 1996. Anormalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetación Liquid Water From Space. Remote sens. Estados Unidos (EU). Environ 55257-266. 10 pp.
- Galindo, G., Espejo, O., Rubiano, J., Cabrera, E., 2014. Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia. Colombia (CO). ISBN 978 958 8067 63 3. 52 pp.

- García, A., 2012. Criterios modernos para evaluación de la calidad del agua para riego. International Union of Soil Science. 10 pp.
- García, E., Flego, F. 2014. Agricultura de Precisión. [en línea] [consultado 02 de noviembre del 2017] Disponible en el World Wide Web: <<http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>>
- García, F., Gil, M., García, P. 2017. El vino y su servicio. 2ª edición. Madrid (ES). ISBN: 978-84-283-3862-2.
- García, I., 2017. Estudio sobre vehículos aéreos no tripulados y sus aplicaciones. [Tesis Ingeniería. Eléctrica] España (ES): Universidad de Valladolid. 196 pp.
- García, R., Mudarra, I., 2008. Buenas Prácticas de Producción Ecológica. Cultivo de la Vid. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. España (ES). ISBN: 978-84-491-0866-2. 36 pp.
- Garrido, S., 1994. Interpretación de análisis de suelos. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España (ES). ISBN: 84-341-0810-0. 40 pp.
- Gil, E., Aranda, I., Peguero, J., Vilagrosa, A. 2005. El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. España (ES). 13 pp.
- Glavan, M., Cvejic, R., Tratnik M., Pintar, M., 2013. Geospatial Analysis of Water Resources for Sustainable Agricultural Water Use in Slovenia. 22 pp.
- Glenn, E., Neale, C., Hunsaker, D., Nagler, P. 2011. Vegetation index-based crop coefficients to estimate evapotranspiration by remote sensing in agricultural and natural ecosystems. Hydrological Processes, 25: 4050-4062. Estados Unidos (EU). 13 pp.
- Goldhamer, D., Fereres, E. 2005. The Promise of Regulated Deficit Irrigation in California's Orchards and Vineyards California. Water Plan Update 2005 Volume 4.
- González, M., Neale, C., Mateos, L., Kustas, W., Prueger, J., Anderson, M., Li, F. 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. Agricultural and Forest Meteorology, 149: 1843-1853 11 pp.
- Gordillo, V., Flores, H., Tijerina, L., Arteaga, R. 2014. Estimación de la evapotranspiración utilizando un balance de energía e imágenes satelitales. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol 5. Num 1., México (MX). 13 pp.
- Guardiola, J., García, A. 1990. Fisiología vegetal I: Nutrición y Transporte. España (ES). ISBN: 8477380953. 440 pp.
- Gutiérrez, S., Diago, M., Fernández, J., Tardaguila, J. 2018. Vineyard water status assessment using on-the-go thermal imaging and machine learning. España (ES). 18 pp.

- Guzmán, C., Valenzuela, C., Félix, P., Jiménez, A., Ruiz, S. 2008. Necesidad hídrica de los principales cultivos en el estado de Baja California. INIFAP. México (MX). 35 pp.
- Hargreaves, G. 1994. Defining and using reference evapotranspiration. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120(6), 1132-1139. 15 pp.
- Heilman, J., Heilman, W., Moore, D. 1982. Evaluating the crop coefficient using spectral reflectance. *Agronomy Journal*, 74: 967-971. 5 pp.
- Heras, A., Sánchez, M., 2017. Diseño de un Vehículo Aéreo no Tripulado multipropósito. [Tesis Ingeniería. Electrónica, industrial y automática] Colombia (CO): Universidad Politécnica de Cartagena. 162 pp.
- Hernández, Y., Betancourt, A., 2015. Historelo. Agua y abastecimiento: gestión de cuerpos de agua en la ciudad de San Luis Potosí (México), 1831-1887. México (MX). Vol.7, ISSN: 2145-132X, 60-98 p.
- Hidalgo, J., 2006. La calidad del vino desde el viñedo. España (ES). ISBN: 9788484762799. 360 pp.
- Hugalde, I., Vila, H. 2014. Comportamiento isohídrico o anisohídrico en vides. ¿Una controversia sin fin? Argentina (AR). ISSN 1669-2314. 8 pp.
- Idso, S., Reginato, R., Clawson, K., Anderson, M. 1984. ON THE STABILITY OF NON-WATER-STRESSED-BASELINES. Estados Unidos (EU). *Agricultural and Forest Meteorology*, 32 (1984) 177 – 182. 6 pp.
- Idso, S. 1982. Non-water-stressed-baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. Estados Unidos (US). *Agricultural Meteorology*, 27(1982) 59-70. 12 pp.
- Idso, S., Jackson, R., Pinter, P., Reginato, R., Hatfield, J. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55. 12 pp.
- InfoStat. Software Estadístico. 2016. Manual de usuario. Versión 2008.
- Instituto Español del Comercio Exterior (ICEX). 2015 El mercado del vino en México.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 1983. Estudio general de los suelos de los municipios se conforman la parte media y baja de la cuenca del Río Sinú. Colombia (CO). 8 pp.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 1983. Relación Agua Suelo Planta: Requerimientos de Agua de las Plantas en Relación en el Clima y el Suelo para una Producción Optima. República Dominicana (DO). ISSN 0534-5391.

- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2014. Manual de agricultura de precisión. Costa Rica (CR). ISBN: 978-92-9248-545-0. 178 pp.
- Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). 2017. Manual de manejo agronómico para cultivo de melón. Boletín INIA n° 01. Chile (CL). ISSN 0717-4829. 92 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2000. Los análisis físicos y químicos en la cartografía edafológica del INEGI. Guía Normativo-Methodológica. México (MX).
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2002. Estudio Hidrológico del Estado de San Luis Potosí. 1ª Edición. México (MX). ISBN 970-13-3631-3. 136 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2017. Anuario estadístico y geográfico de San Luis Potosí 2017. México (MX). 623 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). SIATL Versión 3.1 México (MX). [en línea] [consultado 13 de marzo del 2017] Disponible en el World Wide Web: < http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/# >
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2012. Muestreo de Suelos y preparación de muestras. Publicación clave: INIFAP/CIRNE/A-487 MX-00310391-52-03-13-12-23. México (MX). 2 pp.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). 2000. Percepción remota.
- Itenfisu, D., Elliott, L., Allen, R., Walter, I. 2003. Comparison of reference evapotranspiration calculations as part of the ASCE standardization effort. J. Irrig. Drain. Eng. 129(6), 440-448. 9 pp.
- Izquierdo, P., Chacón, J., Fernández, M., Martínez, J., García, E., Torres., R. 2009. Detección, identificación y tratamiento de los hongos responsables de las enfermedades de la madera en vid. Instituto de la Vid y el Vino Castilla la Mancha. España (ES). 10 pp.
- Jackson, R., Idso, S., Reginato, R., Pinter, J. 1981. Canopy temperature as a Crop Water Stress Indicator. Water Resources Research, 17 (4), 1133–1138. 13 pp.
- Jackson, R. Idso, S.B. Reginato, R.J. Pinter, P.J. 1988. Canopy temperature as a crop water-stress indicator. Water Resour Res 17, 1133-1138
- Jackson, R., Reginato, R., Idso, S. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. Water Resources Research 13: 651–656. 14 pp.
- Koundouras, S., Van Leeuwen, C., Seguin G., Glories, Y. 1999. Influence de l'alimentation en eau sur la croissance de la vigne, la maturation des raisins et les caractéristiques des vins en zone méditerranéenne (exemple de Némée, Grèce, cépage Saint-Georges, 1997) J. Int. Sci. Vigne. Vin. 33. N°4, 149-160. Francia (FR). 12 pp.

- Kruse, F.A. (2004). Comparison of ATREM, ACORN, and FLAASH Atmospheric corrections using low-altitude AVIRIS data of Boulder, CO.
- Lissarrague, J., 2012. Consecuencias del déficit hídrico en viñedos de zonas cálidas y estrategias de riego en función de los objetivos de la producción de uva. III Jornadas de riego y nutrición: vid y olivar. España (ES). 7 pp.
- López, E. 1991. Corrección atmosférica en el espectro solar. Por J. Meliá (Ed). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales.
- López, R., Arteaga, R., Vázquez, M., López, I., Sánchez, I. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. Campo experimental Inifap. México (MX). 16 pp.
- López, Y., 2000. Relaciones hídricas en el continuo agua-suelo-planta-atmósfera. Colombia (CO). ISBN: 958-8095-05-0. 90 pp.
- Lovisollo, C., Hartung, W., Schubert, A. 2002. Whole-plant hydraulic conductance and root to shoot flow of ABA acid are independently affected by water stress in grapevines. Functional plant biology 29:1349-1356. 8 pp.
- Maas, E., Hoffman, G., 1984. Crop salt tolerance – current assessment. U.S Department of Agriculture. Estados Unidos (EU). 42 pp.
- MAPIR. 2018. Cámara Survey2_Informativo. [en línea] [consultado 31 de julio del 2018] Disponible en el World Wide Web: <<https://www.mapir.camera/products/survey2-camera-ndvi-red-nir>>
- Martínez, A., Ramírez, J. 2005. Desarrollo actual de la Geoestadística en el mundo. Minería y Geología, vol. 21. n° 4. Colombia (CO). ISSN 0258-5979. 22 pp.
- Martínez, G. 2013. Fundamentos Relevantes de la Viticultura en México. INIFAP. Libro Técnico No. 11.
- Martínez, M. 2015. Estudio comparativo de las relaciones hídricas y producción en uva de mesa bajo riego deficitario (RD) y desecación parcial de raíces (DPR). Efecto del déficit continuo y controlado. [Tesis Maestría. Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario.] Cartagena (CO): Universidad Politécnica de Cartagena. 68 pp.
- Matese, A., Baraldi, R., Berton, A., Cesaraccio, C., Filippo, S., Duce, Pierpaolo, Facini, O., Giuseppe, M., Piga, A., Zaldei, A. 2018. Estimation of Water Stress in Grapevine Using Proximal and Remote Sensing Methods. Francia (FR) Remote Sens. 10,114. 16 pp.
- MacFaddin. J. 2003. Biochemical tests for identification of medical bacterial. 3ª edición. Uruguay (UY). ISBN 950-06-1572-X. 839 pp.

- May, J., Ortega, H., Can, A., 2016. Calidad del agua para riego agrícola del sistema hidrográfico Lerma-Chapala-Santiago. México (MX). 14 pp.
- McAlavy, T. 2004. Researchers target deficit irrigation for wine grapes. Texas A&M University System Agriculture Program Publication.
- McCarthy, M. 2004. Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. FAO Corporate Document Repository.
- McFeeters, S. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.
- Medina, E., Mancilla, O., Larios, M., 2016. Calidad del agua de riego y suelos agrícolas de Tuxcacuesco, Jalisco. Vol. 34. México (MX). 10 pp.
- Meneses, C. 2011. El índice normalizado diferencial de la vegetación como indicador de la degradación del bosque. *Unasulva* 238. Vol 62. 8 pp.
- Ministerio de Agricultura (MAG). 2004. La salinidad de los suelos y sus efectos en la agricultura. Ecuador (EC). 32 pp.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). Requerimientos agroclimáticos del cultivo de vid. Ficha técnica N°10. Ofic. 209-8800 anexo 4233. Perú (PE).
- Molina, E. 2001. Manejo de suelos y fertilidad de café. Fertilidad de Suelos y Manejo de la Nutrición de Cultivos en Costa Rica. Universidad de Costa Rica: Centro de Investigaciones Agronómicas: laboratorio de suelos y foliares. Costa Rica (CR). 142 pp.
- Möller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Ostrovsky, V., Sprintsin, M., Cohen, S. 2006. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. Israel (EL). *Journal of Experimental Botany*. Vol. 58. 12 pp.
- Monteith J.L. 1995. A reinterpretation of stomatal conductance to humidity. *Plant. Plant Cell Environ.*, 18, pp.
- Montero, J., Larraz, B., 2008. Introducción a la Geoestadística lineal. España (ES). ISBN: 978-84-9745-347-9. 139 pp.
- Moyer, M., 2015. Conceptos básicos de riego para los viñedos del Este de Washington. Washington State University. 14 pp.
- Moyer, M. 2015. Podredumbre por Botrytis en la uva para producción comercial en Washington: Biología y manejo de enfermedades. Washington State University. 5 pp.
- Morín., C. 1980. Cultivo de cítricos. Universidad Nacional Agraria La Molina. Perú (PU).

- Myburgh, P. 1996. Response of *Vitis vinifera* L. cv. Barlinka/Ramsey to soil water depletion levels with particular reference to trunk growth parameters. *S. Afr. J. Enol. Vitic.* Vol. 17. N° 1, 3-14. 12 pp.
- Neale, C. 1987. Development of Reflectance-based crop coefficients for corn. Ph. Dissertation. Colorado State University. Fort Collins. Estados Unidos (EU). 8 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. 2002. Diario Oficial. Segunda Sección. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México (MX). 73 pp.
- Norma Oficial Mexicana NOM-44-072-SCFI-2001. 2001. Análisis de agua – determinación de Dureza Total en Aguas naturales, residuales y residuales tratadas – Método de prueba. Diario Oficial. Segunda Sección. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México (MX). 19 pp.
- Norton, G., Swinton, S. 2000. Precision Agriculture: Global Prospects and Environmental Implications.
- Novello, V., Schubert, A., Antonietto, M., Bosch A. 1992. Water relations of grapevine cv. Córtese with different training systems. *Vitis* 31,65-75. Roma (IT). 11 pp.
- Oficina de Información Científica y Tecnológica para el congreso de la unión (INCYTU). 2018. Agricultura de precisión. N° 015. México (MX).
- Ojeda, D., Rodríguez, A., López, R., Leyva, A., García, S., 2012. Aspecto a considerar por los viticultores de Chihuahua en la nutrición de vid para vino. México (MX). 7 pp.
- Ojeda, W., 1999. Pronóstico del riego en tiempo real. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. 2ª ed. 230 pp.
- Ojeda, W., Flores, J., Ontiveros, R. 2016. Uso y manejo de drones con aplicaciones al sector hídrico. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México (MX). ISBN 978-607-9368-71-5. 427 pp.
- Ojeda, W., González, A., Mauricio, A., Flores, J. 2017. Aplicación de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México (MX).
- Olalla, F., López, P., Calera, A., 2005. Agua y Agronomía. México (MX). ISBN: 84-8476-246-7. 603 pp.
- Ongley, E. 1997. Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos. FAO. ISBN 92-5-303875-6. Italia (IT).
- Organización Internacional de la Viña y el Vino. (OIV) 2012. Informe estadístico 2012 de la OIV sobre la vitivinicultura mundial.

- Organización Internacional de la Viña y el Vino (OVI). 2015. Elementos de la coyuntura vitivinícola mundial. Comunicado de prensa.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), 2009. Guía para la descripción de suelos. 4ª edición. Roma (IT). 111 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 2016. Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. París (Francia). ISBN 978-92-3-300045-2. 148 pp.
- Oster, J., Schroer. W., 1979. Infiltration as influenced by irrigation water quality. Soil Sci. Soc. Am. J. 43: 444-447 pp.
- Otero, L., Alden, F., Gálvez, v., 2007. Caracterización y evaluación de la salinidad. Cuba (CU). R. 1689-2007. 9 pp.
- Palacios, A., Rodríguez, M., Barajas, G., 2010. Tratamiento electrostático (ESP) del agua para riego. México (MX) 6 pp.
- Pascual, N., Cabrerizo, A., 1995. Distribución espacial del viñedo de Rioja en relación con las condiciones ambientales. España (ES). 22 pp.
- Payán, S., Morales, A., Valdez, B., Martíá, M., Ibarra, F. 2013. Programación del riego de vid (*Vitis vinifera* L.) de mesa “Perlette” y “Sugraone” con sensores de humedad. INIFAP. México (MX). 10 pp.
- Pérez Pena, J.E., Tarara, J.M. 2004. Whole-Canopy Photosynthesis And Transpiration Under Regulated Deficit Irrigation In *Vitis Vinifera* L. Cv. Cabernet Sauvignon. [Tesis Doctorado. Philosophy] Estados Unidos (EU): Washington State University. 261 pp.
- Pinto, M., Lira, W., Ugalde, H., Pérez, F. 2003. Fisiología de la latencia de yemas de vid. Hipótesis actuales. Chile (CL) 17 pp.
- Posada, E., Ramírez, H., Espejo, N. 2012. Manual de prácticas de percepción remota con el programa ERDAS IMAGINE 2011. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF). Colombia (CO). 154 pp.
- Potters, G., Pasternak, T., Guisez, Y., Palme, K., Jansen, M. 2007. Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble? Trends Plant Sci. 12(3), 99-105.
- Prichard, T. 2004. “Imposing water deficits to improve wine quality & reduce costs.” University of California Cooperative Extension: Land, Air and Water Resources publication.

- Recursos renovables: Agricultura. España (ES). [en línea] [consultado 12 de enero del 2018] Disponible en el World Wide Web: <https://www.researchgate.net/publication/40933495_La_Teledeteccion_en_el_seguimiento_de_los_fenomenos_naturales_recursos_renovables_agricultura_Valencia_25_febrero-9_marzo_1991>
- Richards, L., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural Handbook 60. Estados Unidos (EU). 160 pp.
- Rodríguez, C. 2009. Viticultura de precisión y Teledetección: relación entre índices de reflectancia espectral y parámetros de vigor en parcelas de viñedos de la variedad Chardonnay. [Tesis Licenciatura. Ingeniería Técnica Agrícola, especialidad de Horticultura y Jardinería] España (ES): Universidad Politécnica de Catalunya. 69 pp.
- Rodríguez, P. 1996. Plagas y enfermedades de la vid en Canarias. 3ª Edición. Canarias (ES). Gobierno de Canarias. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación. 29 pp.
- Romero, Y. 2017. Variación de la edafología y estrés hídrico en *Vitis vinifera* L. con relación al relieve en un viñedo del Valle de Guadalupe, B.C., México. [Tesis Maestría. Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales] México (MX): Centro de Investigaciones Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 66 pp.
- Rouse, J., Haas, R., Schell, J., Deering, D., 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. En: NASA, Goddard Space Flight Center 3d ERTS.
- Rouse, J., Haas, R., Shell, J., Harlan, J. 1974. Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. Final Report, Type III. Greenbelt, MD, NASA/GSFC: 371.
- Rucks, L. García, F., Kaplán, A., Ponce, J., Hill, M., 2004. Propiedades físicas del Suelo. Uruguay (UY). Universidad de la República de Uruguay. Facultad de Agronomía. 68 pp.
- Rundell, P., Jarrell, W. 1991. Water in the environment. eds: Plant Physiological Ecology: Field Methods and Instrumentation. London. 29-56 pp.
- Sadeghian, S., 2012. Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiable en suelos de la zona cafetalera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almácigo. [Tesis Doctorado. Ciencias Agropecuarias] Colombia (CO): Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 181 pp.
- Salisbury, F., Parke, R. 1968. Las plantas vasculares: forma y función. México (mx). 1ª edición. 198 pp.
- Salomón, A. 2004. La industria vitivinícola: La producción de vino en México. Comercio exterior. Vol. 54. Num. 9. 8 pp.

- Sarabia, I., Cisneros, R., Aceves, J., Durán, H., Castro, J., 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del Valles de San Luis Potosí, México. México (MX). *Rev. Int. Contam Ambie.* 27 (2) 103- 113. 11 pp.
- Scholander, P.F., Hammel, H.T., Bradstreet, E.D. y Hemingsen, E.A. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science* 148, 339–346.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA),., Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2010. Salinidad del Suelo. México (MX). 59 pp.
- Seguin, G. 1980. Influence des facteurs naturels sur le caractèredes vins. In "Science et technique de la vigne" , Tomo I, Francia (FR). Sumner, M., 1999. *Handbook of Soil Science*. Estados Unidos (ES). ISBN 0-8496-3136-6.
- Sela, G., 2017. El cloruro en las Plantas, Agua y Suelo.
- Sepúlveda, D., Ingra, B., Bardeen, M., Zúñiga,M., Ortega, S., Poblete, C. 2016. Selecting Canopy Zones and Thresholding Approaches to Assess Grapevine Water Status by Using Aerial and Ground-Based Thermal Imaging. *Remote Sens.* 8, 822. Chile (CL). 17 pp.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Using the USGS Landsat 8 Product. 2013. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Using the USGS Landsat Level-1 Data Product. 2017 Department of the Interior. U.S. Geological Survey.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2012. Reglas de Operación y Programación Sectorial. SAGARPA. México (MX).
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2018. Avances de Siembra y Cosecha. Resumen nacional por estado.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2018. Utilidad de la Frontera Agrícola de México. SAGARPA. México (MX).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2014. Suelos. México (MX).
- Sellés, G., Ferreira, E., Sellés, I. 2000. Uva de mesa en chile. Editorial Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Chile (CH). 338 pp.
- Shao, H., Chu, C., Zhao, C. 2008. Water-deficit stress-induced anatomical changes in higher plants. *C.R. Biol.* 331, 215-225.
- Sierra, C., Céspedes,R., Osorio, A. 2001. Caracterización de la salinidad de los suelos y aguas del valle del río Copiapó. *Boletín INIA n° 70*. Chile (CL). ISSN 0717-4829.

- Soar, C., Speirs, J. Maffel, S., Penrose, A., Mccarthy, M., Loveys, B. 2006. Grape vine varieties Shiraz and Grenache differ in their stomatal response to VPD: apparent links with ABA physiology and gene expression in leaf tissue. *Australian Journal of Grape and Wine Research*; 12:2-12. 18 pp.
- Sobrinho, J. 2000. Teledetección. España (ES). ISBN 84-370-4220-8. 460 pp.
- Sotés, V. 2011. Avances en viticultura en el mundo. Rev. Bras Frutic. Vol. Especial. Brasil (BR). E 131 – 143 13pp.
- Spectrum Technologies. Inc. 2008. Watermark Soil Moisture Sensor. Catalog #6450.
- Tardieu, F., Simonneau, T. 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *Journal of Experimental Botany* 49, 419-432. 14 pp.
- Taboada, J., Cotos, J., 2005. Sistemas de información medioambiental. España (ES). ISBN: 84-9756-056-6. 242 pp.
- Taghvaeian. S., Cháves, J., Hansen, N. 2012. Infrared Thermometry to Tstimate Crop Water Stress IndeX and Water use of Irrigation Maize in Northeastern Colorado. *Remote Sens.* 3619-3637. Estados Unidos (EU). ISSN 2070-4292 19 pp.
- Thompson, L., Troeh, F. 1988. Los suelos y su fertilidad. 4ta edición. España (ES). ISBN: 84-291-1041-0 657 pp.
- Tucker, C.J., 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- United States Departament of Agriculture (USDA). 1954. Diagnostic and Improvement of Saline and Alkali Soils. Agriculture Handbook No.60 United States (US). 166 pp.
- Uriarte, D., Manca, A., Gómez, O., Prieto, M. 2014. Manual práctico de riego de vid para vinificación. CICYTEX. Departamento de Hortofruticultura, Grupo de riego y nutrición. España (ES). Dep. Legal: BA-235/2014. 16 pp.
- Valdés, A., Palma, J. 2017. Características nutricionales y edáficas de principales frutales en Chile. SQM. The Worldwide Business Formula. Chile (CL). 208 pp.
- Valor, O., Sánchez, J. 2003. Brotación, fertilidad de brotes laterales y ubicación del racimo en el cultivar de vid Tucupita en condiciones tropicales. Venezuela (VE). Vol. 15. Num 3. ISSN: 1316-3361 201-208 pp.

- Vanino, S., Pulighe, G., Nino, P., De Michele, C., Falanga, S., D'Úrso, G. 2015. Estimation of Evapotranspiration and Crop Coefficients of Tendone Vineyards Using Multi-Sensor Remote Sensing Data in a Mediterranean Environment. *Remote sensing*. 14708-14730. 23 pp.
- Van Leeuwen, C., Seguin, G. 1994. Incidences de l'alimentation en eau de la vigne, appréciée par l'état hydrique du feuillage, sur le développement de l'appareil végétatif et la maturation du raisin (*Vitis vinifera* variété Cabernet franc, Saint-Emilion 1990). *Journal International Sciences de la Vigne et du Vin* 28, 81-110 10 pp.
- Vaquero, M., 2014. Guía de curso: El riego y drenaje en la agricultura. Universidad EARTH. Costa Rica (CR). 99 pp.
- Vargas, J. 2015. Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá. [Tesis Maestría: Magister en Ingeniería Agrícola] Colombia (CO): Universidad Nacional de Colombia. 134 pp.
- Vera, L., Yañez, J., González, F., Lagunes, M. 2016. Aceptación de aplicaciones móviles como apoyo a la decisión de compra de vinos por parte de jóvenes universitarios de San Luis Potosí. ISSN 2007-2104. 27 pp.
- Vieira, R., Adriano, J., Luiz, A., De Costa, A., Grah, J., 2014. Water storage variability in a vineyard soil in the southern highlands of Santa Catarina State. Brasil (BR). *R. Bras. Ci. Solo*, 38:82-93. 12 pp.
- Villarías, J., Álvarez, J., Garzón, E., 2011. Carencias nutricionales y síntomas producidos en los distintos órganos de la vid. 4 pp.
- Villareal, P., Romagnoli S., Llorente A., 2007. Pautas tecnológicas: vid para vinificar. Manejo y análisis económico financiero. 1ª. Ed INTA. Argentina (AR). ISBN-13: 978-987-521-229-9. 104 pp.
- Vivai Cooperative Rauscedo sca. 2013. Catálogo general de las variedades y los clones de uva de vino y de mesa. Italia (IT) 156 pp.
- Wang, X., Xie, H., Guan, H. y Zhou, X. (2007). "Different responses of MODIS-derived NDVI to root-zone soil moisture in semi-arid and humid regions." *Journal of Hydrology* 340: 12- 14.
- Westwood, M. 1982. *Fruticultura de zonas templadas*. Editorial. Mundi Prensa, Madrid. 461 pp.
- Williams, L. 2001. Irrigation of winegrapes in California. *Practical Winery & Vineyard*. 23:42-55.
- Williams, L., Matthews, M. 1990. Grapevine. En: B.A. Stewart y D.R. Nielsen (eds.). *Irrigation of agricultural crops*. Agronomy Monograph N° 30. 1019-1055 Estados Unidos (EU). 11 pp.

- Williams, L., Trout, T., 2005. Relationships among Vine - an Soil - based measures of water status in a Thompson seedling vineyard in response to high-frequency drill irrigation. *American Journal Enol. Vitic.* Vol. 56: 4.
- Zermeño, A., Melendres, A., Fuerte, L., Mungula, J., Ibarra, L. 2016. Tasa de evapotranspiración del cultivo de la vid y su relación con la de referencia del método FAO PENMAN-MONTEITH. *Agrociencia* 51: 1-12.2017. México (MX) 13 pp.
- Zermeño, A., Melendres, A., Fuerte, A., Mungulia, J., Ibarra, L. 2017. Evapotranspiration rate of vineyard and its relation to the reference of the FAO Penman-Monteith. *Agrociencia*, vol. 51, num. 1. México (MX). ISSN: 1405-3195. 13 pp.