

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de investigación y estudios de Posgrado

**Correlación entre la disponibilidad de agua y la concentración de carbono en
el Área Natural Protegida Sierra de Álvarez, mediante procesos de
teledetección.**

Tesis para obtener el grado de
Maestra en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Karen Lizeth Cáceres Ruíz

Asesor:

Dr. Abraham Cárdenas Tristán

Co-Asesor

Dr. Oscar Reyes Cárdenas

San Luis Potosí, diciembre del 2021



**FACULTAD DE
INGENIERÍA
UASLP**



17 de junio de 2021

**ING. KAREN LIZETH CÁCERES RUÍZ
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Abraham Cárdenas Tristán y Oscar Reyes Cárdenas**, *Asesor y Coasesor de la Tesis* que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Tecnología y Gestión del Agua**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 17 de junio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

“Correlación entre la disponibilidad de agua y la concentración de carbono en el Área Natural Protegida Sierra de Álvarez, mediante procesos de teledetección.”

Introducción.

1. Caracterización biofísica del Área Natural Protegida Sierra de Álvarez
2. Estimación de la disponibilidad de agua en el Área Natural Protegida Sierra de Álvarez
3. Estimación y modelación de biomasa y carbono en el Área Natural Protegida Sierra de Álvarez
4. Correlación estadística entre la disponibilidad de agua y carbono en el Área Natural Protegida Sierra de Álvarez

Conclusiones.

Referencias.

“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”

A T E N T A M E N T E


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR

www.uaslp.mx

Copia. Archivo.
*etn

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Créditos institucionales

Agradezco al CONACYT el otorgamiento de la beca de sostenimiento para la realización de los estudios de maestría.

Al programa de Maestría en Tecnología y Gestión del Agua a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC).

Agradecimientos

*A mi familia, mis padres **Euither Cáceres** y mi madre **Yina Ruíz**, a mis hermanas y en especial a mi sobrina **Emmily Vásquez Cáceres** quien es mi motivo a ser cada día mejor.*

*A mi novio **Martín Villegas** por su amor y apoyo incondicional y a su familia quienes me han acogido como parte de ella desde que llegué a México.*

*A mis amigas **Nasly Parra**, **Natalí Suárez** y **Carolina Romero** con quienes coincidí en este mismo objetivo académico y han sido mi familia en este país.*

*A mis compañeros de maestría, en especial a **Gloria Fonseca**, con la que nos hemos apoyado durante este proceso académico y de estancia en México.*

*Al Dr. **Abraham Cárdena Tristán** por su ayuda, asesoría y acompañamiento continuo en el desarrollo de la investigación, por su paciencia y motivación, y principalmente por abrirme las puertas de su hogar, por lo cual también estoy profundamente agradecida con su esposa **Eyra Pérez** y sus hijos **Alexis Cárdenas** y **Jesé Cárdenas**, quienes fueron mi familia y mi apoyo durante el tiempo que estuve en San Luis Potosí.*

Al Dr. Oscar Reyes Cárdenas, por su guía académica y su siempre disposición para la realización de esta investigación.

Al Dr. Cristóbal Aldama quien como coordinador del programa y como docente, fue un gran apoyo y guía durante el proceso académico.

Al Dr. Hilario Charcas, por sus importantes aportaciones de conocimiento y experiencia en la zona de estudio, la cual retroalimentaron significativamente esta investigación.

Y a todas las personas que de una u otra forma permitieron la culminación de este trabajo de tesis.

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	1
Planteamiento del problema.....	3
Justificación.....	4
Hipótesis.....	6
Objetivos.....	6
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos.....	6
Antecedentes.....	6
1. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE ÁLVAREZ.....	14
1.1. Descripción del Método.....	14
1.2. Descripción de la zona de estudio.....	15
1.3. Caracterización climatológica.....	16
1.4. Caracterización general hídrica del ANP.....	17
1.5. Caracterización general de la vegetación del ANP Sierra de Álvarez.....	19
2. ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE ÁLVAREZ.....	21
2.1. Recopilación teórica de la estimación de agua.....	21
2.1.1. Ciclo del agua.....	21
2.1.2. Evapotranspiración.....	22
2.1.3. Servicios ecosistémicos hídricos.....	22
2.1.4. Balance hídrico.....	23
2.1.4.1 Métodos del balance hídrico superficial.....	24
2.2. Estimación de la disponibilidad de agua a partir del balance hídrico superficial en el ANP Sierra de Álvarez.....	26
2.2.1. Balance hídrico por el método Thornthwaite.....	26
2.2.2. Análisis de temperatura y precipitación.....	27
2.3. Resultados de la estimación de la disponibilidad de agua.....	29

2.3.1.	Cálculo de Evapotranspiración.....	29
2.3.2.	Cálculo del balance Hídrico.....	30
2.3.3.	Estimación espacial mediante interpolación.....	33
3.	ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE ÁLVAREZ.....	35
3.1.	Recopilación teórica de estimación de biomasa y carbono.....	35
3.1.1.	Biomasa forestal aérea.....	35
3.1.2.	Los bosques y su participación en la captura de carbono.....	36
3.1.2.1.	Flujo de carbono.....	37
3.1.3.	Métodos para la estimación de biomasa y carbono.....	38
3.1.3.1.	Estimación por modelos alométricos.....	39
3.1.3.2.	Teledetección en la estimación de biomasa y carbono....	39
3.1.3.2.1.	Índice de vegetación normalizado (NDVI).....	40
3.1.3.2.2.	Imágenes satelitales Landsat 8 OLI.....	41
3.1.3.2.3.	Modelación.....	42
3.1.4.	Inventario Nacional Forestal y de Suelo INFyS.....	43
3.1.4.1	Metodología del INFyS en México.....	44
3.2.	Resultados de la estimación de biomasa aérea y C en el ANP.....	45
3.2.1.	Cálculo de biomasa aérea y C con modelos alométricos.....	45
3.2.2.	Índice de vegetación normalizado NDVI.....	48
3.2.2.1.	Preprocesamiento de imágenes.....	48
3.2.2.2.	Cálculo del NDVI.....	51
3.2.3.	Modelación de Biomasa en el ANP Sierra de Álvarez.....	55
3.2.3.1.	Modelación por álgebra de.....	55
3.2.3.2.	Modelación por interpolación.....	58
4.	CORRELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA Y CARBONO EN EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE ÁLVAREZ.....	59
4.1.	Recopilación teórica de la correlación.....	59
4.1.1	Correlación estadística.....	60

4.1.2. Coeficiente de correlación Pearson.....	61
4.2. Aplicación del método de interpolación para la correlacionar agua y carbono.....	62
4.3. Resultados de correlación.....	62
4.4. Correlación.....	65
CONCLUSIONES.....	68
Recomendaciones.....	71
REFERENCIAS.....	72

Índice de figuras

Figura 1. Metodología general.....	14
Figura 2 Mapa de ubicación ANP Sierra de Álvarez.....	16
Figura 3 Caracterización Hidrológica ANP Sierra de Álvarez.....	18
Figura 4 Mapa de clasificación forestal.....	20
Figura 5 Ciclo del agua.....	21
Figura 6. Gráfica Climograma del ANP.....	28
Figura 7. Gráfica de la evapotranspiración promedio mensual (1980-2014).....	29
Figura 8. Gráfica Balance hídrico por estación climática.....	30
Figura 9 Gráfica Evapotranspiración vs precipitación.....	32
Figura 10 Gráfica Diagrama de balance hídrico.....	33
Figura 11 Mapa de interpolación de balance hídrico.....	34
Figura 12 Disposición de carbono en plantas.....	35
Figura 13 Ciclo del Carbono.....	38
Figura 14. Forma y distribución de las unidades de muestreo secundarias (UMS) o, adaptada del IEFyS San Luís Potosí, 2014.....	44
Figura 15. Malla de conglomerados de muestreo INFyS.....	46
Figura 16. Gráfica Cantidad de Biomasa y Carbono en el ANP.....	48
Figura 17. Imagen Landsat 8 OLI (marzo, 2014).....	49
Figura 18. Imagen Landsat 8 OLI (septiembre, 2014).....	49
Figura 19. Corrección de imágenes Landsat 8 OLI.....	50
Figura 20. Escala de valores NDVI.....	51
Figura 21. Mapa NDVI (septiembre y marzo) del ANP.....	52
Figura 22. Histograma NDVI (marzo y septiembre).....	53
Figura 23. Mapa Cobertura vegetal de ANP (marzo y septiembre).....	54
Figura 24. Clasificación de abundancia de vegetación en el ANP.....	55
Figura 25. Mapa Estimación de biomasa aérea por álgebra de mapas.....	57
Figura 26. Mapa Interpolación Kriging simple de Biomasa aérea.....	58
Figura 27. Gráfica relación de biomasa vs balance hídrico.....	63

Figura 28. Línea de tendencia (correlación biomasa vs balance hídrico (septiembre).....	64
Figura 29 Línea de tendencia (correlación biomasa vs balance hídrico (marzo)...	64
Figura 30 . Mapa de correlación entre el balance hídrico y la biomasa del ANP Sierra de Álvarez.....	73

Índice de tablas

Tabla 1 Características del clima (BSkw), tomado de (CONAFOR, 2014).....	17
Tabla 2. Métodos de balance hídrico.....	25
Tabla 3. Relación estación estaciones climáticas ANP Sierra de Álvarez,,,,,,,,,,,,,	27
Tabla 4. Promedio de variables climáticas (marzo y septiembre).....	31
Tabla 5. Características de las bandas imagen Landsat 8 OLI.....	42
Tabla 6. Ecuaciones alométricas para especies arbóreas del ANP.....	47
Tabla 7. Información satelital de las imágenes Landsat 8.....	50
Tabla 8. Modelos de regresión.....	56
Tabla 9. Análisis estadístico.....	63
Tabla 10. Correlación de valores estimados (agua y carbono), marzo.....	
Tabla 11. Correlación de valores estimados (agua y carbono), septiembre.....	67

INTRODUCCIÓN

Los Pagos por Servicios Ambientales (PSA) son las remuneraciones económicas que se realizan a los propietarios de predios por la capacidad que tienen los ecosistemas para generar productos útiles al hombre. En conjunto, estos servicios proveen agua y alimentos, regulan el clima y las inundaciones, y son opciones para la recreación y la investigación (Vargas *et al.*, 2009). Dentro de estos se encuentran los Servicios Ambientales del Bosque (SAB), que son los beneficios que reciben las personas de los diferentes ecosistemas forestales, ya sea de manera natural o por medio de su manejo sustentable (CONAFOR, s/f). Los beneficios pueden ser de forma directa o indirecta. Para consolidar estos pagos existen distintos programas tanto internacionales como regionales y México cuenta con el programa desarrollado desde el 2003 a través de la Comisión Nacional Forestal y diversos socios importantes. Uno de los ejes de este programa tiene como objetivo dirigir estos pagos a las áreas naturales protegidas (ANP), ya que son sectores estratégicos de conservación óptimos para la generación de servicios ambientales.

Uno de los servicios ambientales más reconocidos mundialmente es el carbono, producido por el suelo y los árboles, que es uno de los mitigadores de los gases efecto invernadero, ya que los árboles funcionan como una aspiradora: absorben el dióxido de carbono (CO₂), el carbono (C) lo transforman en madera y el oxígeno (O₂) lo devuelven a la atmósfera (AMBIO, 2018), esto a través del proceso fotosintético en el cual la energía de la luz, se crean moléculas de glucosa (y otros azúcares) a partir de agua y CO₂, mientras que se libera oxígeno como subproducto (Pérez & Carril, 2009).

Por lo anterior la conservación y pago por el mantenimiento de las áreas boscosas como servicio ambiental es uno de los ejes principales que se abordan en acuerdos internacionales como en la XXI Conferencia de las partes del protocolo de Kioto de diciembre de 2015, el cual debe ser cumplido por los países comprometidos en la amortización del cambio climático (Chrysanthis *et al.*, 1991).

México es uno de los países más importantes en la compensación ambiental, ya que cuenta con la capacidad de sus ecosistemas para la producción de carbono.

La meta de contribución comprometida por México es que, para el año 2030, va a reducir en 22% de sus emisiones gases de efecto invernadero con respecto a una línea base. Estas metas fueron incluidas en la reforma a la Ley General de Cambio Climático del 13 de julio de 2018 (AMBIO, 2018)

Para incentivar el crecimiento y la conservación de los bosques, los gobiernos deben realizar contribuciones económicas a través de un sistema de comercio de emisiones (SCE), que es un instrumento de mercado diseñado para reducir emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en donde se negocian los bonos de carbono: un bono de carbono es equivalente a una tonelada de CO₂ (SEMARNAT, 2018).

Otro de los SAB de gran importancia es el servicio hidrológico, puesto que el agua con calidad para consumo humano y en cantidad suficiente para el abasto proporciona servicios ecosistémicos. Lo que se paga en un mercado de agua con calidad es la reducción de niveles de erosión, sedimentación y flujo de nutrientes; en términos de cantidad se estaría pagando la recarga de acuíferos, la regulación de flujos y cauces y la protección contra inundaciones (Espinoza *et al*, 1999). Este servicio hidrológico y el de la captura de C están intrínsecamente relacionados, ya que la vegetación juega un papel fundamental en la regulación del ciclo del agua, el intercambio de energía y el ciclo biogeoquímico del carbono. Los procesos biológicos de la vegetación dependen del agua. Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, por sus siglas en inglés), el agua es un elemento esencial de la gestión forestal sostenible, y los bosques son cruciales para regular el ciclo del agua. Uno de los retos a los que se enfrentan los gestores forestales es aprovechar al máximo los beneficios de los bosques conservando al mismo tiempo los recursos hídricos.

En este contexto, el estudio de la dinámica entre la vegetación y sus variaciones en cuanto a crecimiento, respecto al agua son importantes para una gestión eficaz del bosque, ya que de esta manera la cuantificación a través de esta relación puede dar una estimación acertada del servicio ambiental que una zona en específico ofrece, para esto el uso de tecnologías geoespaciales como la teledetección, para investigar la dinámica del crecimiento de la vegetación y sus

factores influyentes, son la base para garantizar la salud del ecosistema a escala regional o global (Zhang *et al.*, 2018).

El análisis de la información obtenida a partir de imágenes satelitales ofrece la posibilidad de obtener datos consistentes, además de facilitar el trabajo en áreas de difícil acceso. En las últimas décadas ha sido considerado como una opción sustentable y eficiente de alta precisión, ya que es posible integrar diversos factores ecológicos, ambientales y climáticos permitiendo evaluar procesos más complejos en los análisis y presentando mejoras en los resultados (Ancira-Sánchez y Treviño, 2015).

Bajo esta premisa, el presente trabajo busca proponer una metodología de cuantificación de los recursos agua y carbono en el ANP. Para lograrlo se estimará la biomasa a partir del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (INFyS) 2009 – 2014, ya que es el más reciente, de manera que el cálculo se lleva a cabo por medio de las ecuaciones alométricas de cada especie arbórea identificada en la zona de estudio. Para validar los resultados y obtener mayor precisión en la estimación, se precisará una correlación de un índice de vegetación normalizado (NVDI) con los resultados estadísticos del cálculo de biomasa aérea; paralelo a esto se ejecutará un índice de sequía aplicado a bosques, considerando que dicho índice debe integrar la relación directa entre las características de la vegetación y el agua, pues ambas variables son los principales determinantes de la composición, estructura y dinámica de la vegetación (Speich, 2019). Los resultados muestran la disponibilidad de agua y una estimación de la cantidad de carbono en la zona de estudio.

Planteamiento del problema

La Sierra de Álvarez es una zona declarada como área natural protegida, la cual, según el decreto de declaración como ANP del año de 1981 y recategorizado en el año 2000, debe ser manejada como “Área de Protección de Flora y Fauna”, pero hasta el momento no cuenta con un plan de manejo, ni con una caracterización de sus servicios ambientales, lo cual genera que no se tenga

claridad en el aprovechamiento de sus recursos que esta zona ofrece (CONABIO, 2000).

Teniendo en cuenta que la Sierra de Álvarez es de gran importancia para el estado y el país, además que es económicamente potencial para el pago por los servicios de las zonas forestales en materia de protección de cuencas, fijación del carbono, conservación de la biodiversidad y de la belleza del paisaje, y la forma en que se usen y manejen las coberturas boscosas puede incentivar o perjudicar a las actividades y acciones que allí se pretendan realizar.

La falta de recurso económico para realizar cuantificación de los SAB en el ANP con técnicas mecánicas en un área tan extensa es una de las principales dificultades, ya que estos procesos demandan demasiado tiempo y personal humano, por lo que es necesario implementar técnicas de mayor precisión y eficiencia.

Justificación

El aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera es una preocupación mundial, por lo cual se considera como uno de los seis principales gases que intervienen en el efecto invernadero (GEI), de manera que la mitigación de este es uno de los objetivos mundiales en contribución a los programas para el cambio climático, y para ello se ha establecido la conservación de áreas estratégicas amortiguadoras de los GEI, como lo son las captadoras de carbonos, siendo las más potenciales los bosques naturales (Robert, 2002).

El diagnóstico y la caracterización de una zona potencial como sumidero de C, evaluando su capacidad de almacenamiento, es de vital importancia para el manejo y monitoreo del comportamiento sistemático de los bosques. Uno de sus principales atributos, consiste en delimitar la zonificación de la cuenca hidrológica que confluye en la zona. Bajo esta premisa es importante un estudio integral en dicha caracterización.

Teniendo en cuenta el potencial de los recursos naturales en una zona protegida el cual proporciona a la sociedad numerosos bienes y servicios, como agua

potable, control de la erosión, fijación del carbono, conservación de la biodiversidad entre otros efectos. Estos servicios son económicamente significativos, por lo que es preciso cuantificar la cantidad de carbono asimilado como parte de la mitigación de los GEI, y la disponibilidad de agua natural, esta última, depende fundamentalmente del balance entre el agua que entra al sistema por medio de la precipitación y de lo que se pierde por la evaporación en los cuerpos de agua y por la evapotranspiración vegetal. La diferencia entre lo que llueve y se evapora puede escurrir superficialmente (en arroyos y ríos), almacenarse en los cuerpos de agua superficiales, o bien, llegar al subsuelo y recargar los acuíferos en torno al sistema de cuenca de un bosque como parte de la toma de decisiones en el aprovechamiento de los recursos naturales (Bunge, 2010).

Como se mencionó, los bosques naturales son de especial importancia ya que son uno de los mayores sumideros de carbono en el mundo, y las ANP son zonas estratégicas para los programas de PSA que existen a nivel internacional y local, debido a que estos son apoyos económicos importantes que representan un gran beneficio tanto a la comunidad que los recibe, como a la sociedad en general, ya que se busca garantizar la conservación y el manejo adecuado de las ANP (CONANP, 2018).

Para lograr estos beneficios se debe tener claridad en la cuantificación de los servicios ambientales que ofrece el ANP, por lo que en este trabajo de investigación se pretende realizar una estimación del carbono y disponibilidad de agua a partir de cálculos y procesos con Percepción Remota y el uso de Sistemas de Información Geográfica en el ANP Sierra de Álvarez, establecida mediante decreto como área de protección de flora y fauna.

Se relacionará volumen basal arbóreo, evapotranspiración, uso de suelo, concentración de energía, entre otros factores climáticos para estimar la biomasa, zonificando las características del ecosistema respecto a la cuenca hidrológica, para con esto cumplir con la caracterización y descripción del entorno biofísico que se requiere en el programa de manejo ANP de México. La información generada puede ser utilizada para ingresar a los programas de PSA

disponibles y adecuados para el ANP ya que hasta el momento no se encuentra en ninguno.

Hipótesis

Es posible correlacionar la vegetación y el agua para lograr la cuantificación de la cantidad de carbono y disponibilidad de agua en el ANP Sierra de Álvarez, mediante proceso de teledetección, aportando información relevante para el manejo de la zona con acciones frente a los servicios ambientales.

Objetivos

Objetivo general

Correlacionar la disponibilidad de agua y la cantidad de carbono en el Área Natural Protegida “Sierra de Álvarez” mediante procesos de teledetección.

Objetivos específicos

- Estimar la cantidad de carbono a partir de los valores de biomasa aérea aplicado y el índice de vegetación normalizado NDVI.
- Calcular la disponibilidad de agua a partir del balance hídrico en la zona.
- Estimar la correlación estadística entre la disponibilidad de agua y la biomasa.

Antecedentes

El área de estudio ha sido muy poco investigada. A pesar de ser un ecosistema importante para el estado de San Luis Potosí, solo ha tenido estudios de diagnósticos que han sido de gran importancia para el presente trabajo, ya que

sirven de base en la caracterización y reconocimiento de lo que en el ANP Sierra de Álvarez existe y el comportamiento ecológico que presenta.

Uno de los estudios diagnósticos importantes fue realizado por (Lara-Castillo *et al*, 2008) quien contribuyó ampliamente al conocimiento del ANP Sierra de Álvarez analizando a través de ortofotos capturadas en 1970 al 2000, los cambios en la vegetación y su evolución durante ese periodo, a través de un recuento histórico y detallado, abarca las distintas acciones que se llevaron en la zona, además identificó y categorizó los diferentes tipos de vegetación, así como los usos del suelo. Otro estudio que realizó aportación científica en la zona en cuanto a la caracterización vegetal es la caracterización de flora endémica del estado de San Luis Potosí (Nova *et al.*, 2018), al ser el ANP uno de los ecosistemas importantes de estado y con diversidad de vegetación, fue uno de los sitios trascendental en el cual se enlistan especies endémicas.

Respecto a trabajos recopilados con objetivos similares a esta investigación, pero realizada en otro ecosistema importante para el estado de San Luis Potosí como lo es la Sierra de San Miguelito que es considerada, junto con la Sierra de Álvarez, como reservorios de energía indispensables para la ciudad de San Luis Potosí, fue la tesis de maestría realizada por Escobar (2016) en la cual estimó la biomasa forestal por medio de imágenes satelitales, utilizando como base los índices de vegetación NDVI, SAVI, y IAF, mencionando que la mejor alternativa fue el NDVI, ya que considera la mejor relación entre respuestas espectrales y muestras de campo de las mediciones de biomasa. Al ser un ecosistema con características similares a el área de estudio del presente trabajo, sirvió como punto de comparación en las cantidades de biomasa según el tipo de vegetación.

Las técnicas de estimación de los recursos naturales han sido ampliamente estudiados y mejorados, en la actualidad estas se apoyan por la teledetección siendo utilizadas para precisar de manera eficiente los resultados, existen muchos estudios que analizan de manera independiente, tanto el recurso de agua como del carbono, ambos con gran importancia e impacto en los propósitos del cambio climático, pero muy poco se realiza de manera conjunta en busca de

la relación entre ambos servicios, aunque naturalmente estén estrechamente relacionados. Los estudios más relevantes que apoyan el estudio son:

En el trabajo realizado por Reyes (2017), se modeló la biomasa aérea mediante métodos determinísticos (Distancia inversa ponderada) y estocásticos (kriging y cokriging), combinando datos de campo y espectrales. Este trabajo es de gran impacto en cuanto a su metodología, ya que al igual que el presente, se utilizaron datos del INFyS, a partir de los cuales se calculó la biomasa mediante el empleo de ecuaciones alométricas. También se calculó el NDVI utilizando una imagen Landsat 5TM del año 2009 para luego correlacionar los resultados del cálculo de la biomasa y del NDVI. Se obtuvo que la mejor técnica de predicción resultó ser cokriging al presentar el menor RMSE estimando un promedio de hasta 157.01 Mg/ha.

Otro importante aporte fue la estimación de carbono con tecnología remota que fue evaluado por Jara (2018), quien estimó la biomasa aérea y carbono con teledetección en bosques alto-andinos del santuario de fauna y flora Iguaque Boyacá – Colombia, en el cual para dicha estimación se usaron modelos alométricos propuestos por (Perea-Ardila *et al.*, 2018), para los individuos muestreados correlacionando los resultados con los índices NDVI, SAVI y EVI con esto se obtuvo. Según el análisis de Pearson, el índice de vegetación que mejor correlación presentó fue el NDVI de la imagen de temporada seca con un valor de R de 0.88. En esta investigación el autor asegura aumentar la precisión de la estimación de carbono con las imágenes satelitales.

Otro estudio importante que marcó la pauta en esta investigación fue el estudio que realizaron (Hurtado *et al.*, 2017) en donde se calculó con base en trece modelos alométricos la biomasa en función del diámetro y altura total. Se utilizó un muestreo bietápico sobre 250 parcelas circulares de 0.05 ha. Los modelos seleccionados se basaron en los recomendados por el IPCC (2005).

Una de las recopilaciones importantes acerca de la estimación de biomasa sustentada con información satelital la realizaron Lu *et al.* (., 2012), en la cual se abordaron tres estudios con metodologías distintas para el análisis de las imágenes y la estimación de biomasa. El primer caso se realizó en Brasil por (Brondizio *et al.*, 1994), para examinar la capacidad de usar la imagen Landsat TM en la estimación de biomasa aérea, para lo cual se tomaron mediciones de campo para cálculo de la biomasa forestal aérea con base en el diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura de los árboles y se clasificaron Ocho medidas de textura basadas en la matriz de co-ocurrencia de nivel de gris en las imágenes satelitales Landsat TM recopiladas para el caso, además de una clasificación por firmas espectrales, se aplicó análisis de regresión múltiple y correlación de Pearson que se utilizó para analizar las relaciones entre la biomasa y las variables derivadas de la MT y de esta manera hacer una mejora en el estimado de biomasa, con esto demuestra que la textura es una variable importante para mejorar el rendimiento de la estimación de la biomasa para las áreas con una estructura compleja del rodal forestal.

Otro de los sensores de gran relevancia es LIDAR ya que también es ampliamente usado para la consolidación de estudios de los recursos naturales. Un estudio de caso realizado en Sierra Nevada en California utilizó datos LiDAR para estimar la biomasa de la vegetación en el Bosque Experimental Sagehen. Las ecuaciones alométricas de especies de árboles individuales se seleccionaron de la literatura para predecir la biomasa de árboles individuales en función de su DAP. Se obtuvo una nube de puntos LiDAR y se filtraron primero para generar un modelo de elevación digital (DEM) basado en modelos de retorno, ya que este modelo indica si una parcela tendrá mayor biomasa aérea. (Lu *et al.*, 2012) aseguran a través de este estudio que LiDAR puede predecir la biomasa incluso para las parcelas de biomasa muy alta. Además de que la correlación estadística es bastante acertada en estudios anteriores, los coeficientes de determinación de los modelos estadísticos para la estimación de biomasa basada en LiDAR suelen variar de 0.6 a 0.9 dependiendo de las condiciones específicas de la vegetación, la cantidad de observaciones de campo y el enfoque específico utilizado para el modelado estadístico.

Una de las metodologías más actuales y por consiguiente compleja y con poca información en el ámbito de los recursos naturales es la estimación y análisis de incertidumbre del carbono forestal sobre el suelo, por lo que se analizó la investigación realizada en Zhejiang, en el este de China, por Wang y colaboradores (2009), para examinar la incertidumbre de las estimaciones de carbono forestal, en donde se capturaron datos dasométricos y luego se dispusieron en modelos empíricos por especie obteniendo los valores de la biomasa forestal aérea y el carbono. Se utilizó una imagen Landsat ETM+. Las imágenes que tenían la mayor correlación con el carbono forestal se utilizaron para crear estimaciones de carbono forestal con un algoritmo de co-simulación basado en imágenes. Los autores del trabajo mencionan que el producto de la varianza del carbono forestal de la parcela de entrada y la varianza de la relación de bandas, que implica la interacción entre estas dos variables, redujo las incertidumbres de las estimaciones de carbono forestal.

Los anteriores estudios refuerzan la metodología propuesta en la presente investigación en cuanto a la estimación de biomasa y carbono, demostrando que la utilización de imágenes satélites guarda un patrón importante con la composición vegetal.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal es buscar la relación entre la cantidad de agua y carbono del ANP, es importante recabar estudios con metodologías que estimen el recurso hídrico. Cabe resaltar que es escasa la literatura en cuanto a la relación de ambos recursos, por lo que se aborda la estimación de estos de forma individual, de manera que estudios relacionados con la estimación de agua y balance hídrico se retoman los siguientes trabajos de investigación.

El trabajo realizado por Gebreyohannes *et al.* (2013) evaluó los recursos hídricos disponibles en la cuenca de Geba utilizando un modelo de balance hídrico distribuido espacialmente, en el cual los datos de entrada relevantes para el modelo se analizan mapas digitales utilizando imágenes de teledetección, herramientas GIS, bases de datos de la FAO y la NASA, dando resultados presentados en mapas digitales de escurrimiento superficial promedio, estacional

y anual a largo plazo, evaporación, transpiración y recarga de aguas subterráneas. Los resultados del modelo muestran que el 76% de la precipitación en la cuenca se pierde por evapotranspiración, el 18% se convierte en escorrentía superficial y solo el 6% recarga el suelo.

Santillán *et al.* (2014) estimaron el Balance Hídrico Climático (BHC), determinando la evapotranspiración potencial en la cuenca del río Cazonas a través del método de Thornthwaite y Mather, utilizando información de variables climáticas de temperatura y precipitación para el periodo comprendido entre los años 1981-2010. Como resultado de estas estimaciones, se encontró que las láminas de exceso de agua y de escurrimiento anual fueron de 638.63 y 637.02 mm respectivamente, generándose la mayor cantidad de escurrimiento en los meses de mayor precipitación. Además, los meses que corresponden al periodo húmedo y seco fueron identificados, al igual el régimen de las variables climáticas, y la presencia de excesos y déficits de agua en la cuenca durante un ciclo anual.

Cabe resaltar que las investigaciones de disponibilidad de agua son realizadas mayormente en cuencas hidrográficas, siendo el área de estudio delimitados por la misma, que de igual manera siguen siendo apoyo metodológico para la presente investigación, la cual difiere en que la delimitación es el ANP objeto de estudio. Es por esto que también se analiza el trabajo realizado por (Duque-Sarango *et al.*, 2019), quienes estudiaron la variación temporal de la precipitación y la temperatura de la microcuenca Chaquilcay, ecosistema natural situado dentro del Bosque y Vegetación Protector Aguarongo en Gualaceo, Ecuador. Tomando como referencia cuatro estaciones meteorológicas durante el periodo 1982 a 2015. Para cuantificar las contribuciones y pérdidas de agua, se llevaron a cabo análisis estadísticos de las series temporales, mientras que, para llenar y validar las series de precipitación y temperatura, se utilizó un análisis de doble masa desarrollando estaciones de referencia y con ello completar los registros faltantes. El análisis de balance hídrico indica 843.7 mm de precipitación anual total, una diferencia de almacenamiento de 18.71 mm que representa el 2.22% de la precipitación anual total, un excedente de 144.5 mm y

una evapotranspiración real de 680.5 mm, que asciende a 17.13% y 80.65% del total anual de precipitación, respectivamente.

La información recabada que apoya el objetivo principal de esta investigación siendo la correlación entre la estimación de agua y carbono fue de gran importancia. De los trabajos más relevantes en el tema es el realizado por (Manson, 2016), quien analiza la importancia de los servicios hidrológicos brindados los ecosistemas en México, incluyendo la captación de agua y la prevención de ciclos de inundación y sequía, así como la conservación de los suelos, la regulación del clima regional y la reducción del azolve de los cauces de los ríos, además de que propone la mejora de los esquemas PSA como un mecanismo prometedor para aumentar la cobertura boscosa y favorecer el manejo sustentable de los recursos naturales.

La FAO a través de su estudio titulado “Los bosques y el agua” (FAO, 2005) afirma que la eliminación parcial o completa de la cubierta arbórea aumenta el total del caudal fluvial que llega de la zona de captación, debido en gran medida a la disminución de la evapotranspiración de los árboles, que funcionan como “bombas de agua” profundamente arraigadas, pero que siguen siendo el bosque natural de gran beneficio considerando al ecosistema forestal, con su flora y su fauna, en un usuario importante de agua, pero que también proporciona beneficios enormes a la humanidad como la fijación del carbono, control de la erosión y reducción del peligro de alude.

Lo anterior indica una relación de suma importancia entre el flujo de agua y la el porcentaje de cobertura boscosa de una área natural, así fue demostrado por (Vaca et al., 2016), en su estudio mediante el uso de estos dos tipos de modelos para predecir la distribución de especies de árboles mexicanos. Se seleccionaron 258 especies asociadas a cinco diferentes ecosistemas, que varían en su grado de exposición a los períodos de sequía mapeando la dinámica anual de humedad del suelo a lo largo de Mesoamérica, y se comparó la habilidad predictiva de este proceso en contraste con modelos ajustados con precipitación anual afirmando que el balance hídrico del suelo calculado a escala

regional es un predictor valioso para entender diferencias en la distribución de especies de distintos tipos de bosque.

También dicha relación entre ambos recursos (agua y carbono) lo analizan (Lvarez Dávila *et al.*, 2017) quienes describen los patrones de las existencias de biomasa aérea en los principales bosques tropicales a través de gradientes climáticos en el noroeste de América del Sur. Estimando biomasa aérea también en base a ecuaciones alométricas y relacionando variables climáticas como la temperatura media anual y la evapotranspiración real y la precipitación anual, la estacionalidad de la precipitación y la disponibilidad de agua, con esto concluyeron que la biomasa aérea está más relacionada con las variables de disponibilidad de agua que con las variables de energía. Y que disponibilidad de agua influye en las reservas de carbono principalmente al determinar la estructura del rodal, es decir, el área basal. Cuando aumentan los déficits de agua en los bosques, podemos esperar un impacto negativo en la biomasa y, por lo tanto, en el almacenamiento de carbono.

1. CARACTERIZACIÓN BIOFÍSICA DEL ÁREA NATURAL PROTEGIDA

SIERRA DE ÁLVAREZ

1.1. Descripción del Método

Para realizar esta investigación se relacionó la información de dos recursos naturales (agua y carbono) a través de una estimación, lo cual aporta la cuantificación de cada uno de ellos, y con esto valorar el potencial como servicios ecosistémicos del área natural protegida. Para lo anterior y con base en los objetivos planteados, se proponen 3 procesos (figura 1), los cuales son basados en diversos estudios pertinentes para cada proceso, se retomaron y mejoraron según la información y recursos disponibles. Los resultados fueron procesados en el software ArcGIS 10.3 y las imágenes analizadas fueron del programa Landsat 8 y descargadas en la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos USDA.

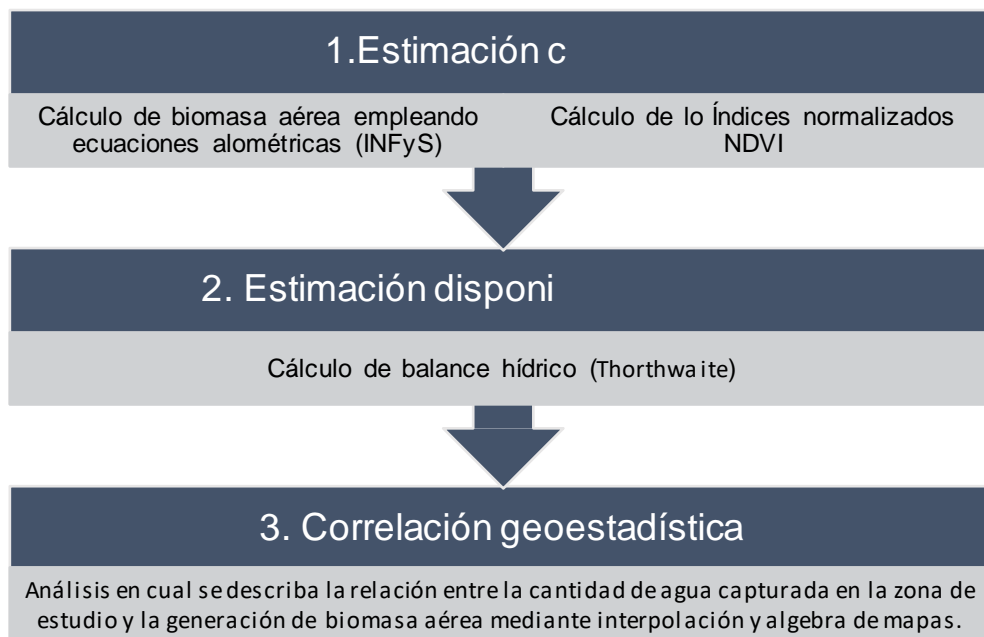


Figura 1 Metodología general

1.2. Descripción de la zona de estudio

El ANP Sierra de Álvarez es de gran importancia ecosistémica en el estado de San Luis Potosí, la cual se encuentra ubicada en la parte norte de la Sierra de Álvarez, entre coordenadas 21° 42' 32" a 22° 23' 21" Latitud N y 100° 05' 24" y 100° 49' 30" Longitud O abarcando parte de los municipios de Armadillo de los Infante y Zaragoza, en el estado de San Luis Potosí, con una superficie de 16,900 ha (Castillo *et al.*, 2008).

El ANP Sierra de Álvarez se encuentra ubicada en la sierra madre oriental. La vegetación predominante corresponde a bosque encino y pino y se considera como bosque subhúmedo, según la caracterización de ecosistemas de México (CONANP, 2018).

Según la caracterización de CONABIO (1989), la región se identifica por estar delimitada por un macizo montañoso con rocas sedimentarias en cuya parte alta se encuentra vegetación templada, principalmente de pino-encino, con algunas áreas de pastoreo y cultivos. En la parte baja se presenta vegetación xerófila tal como matorral crasicaule, matorral submontano y pastizal natural. Se caracteriza por presentar especies de mamíferos endémicos, como las del género *Peromyscus*. A continuación, se muestra la localización del área.

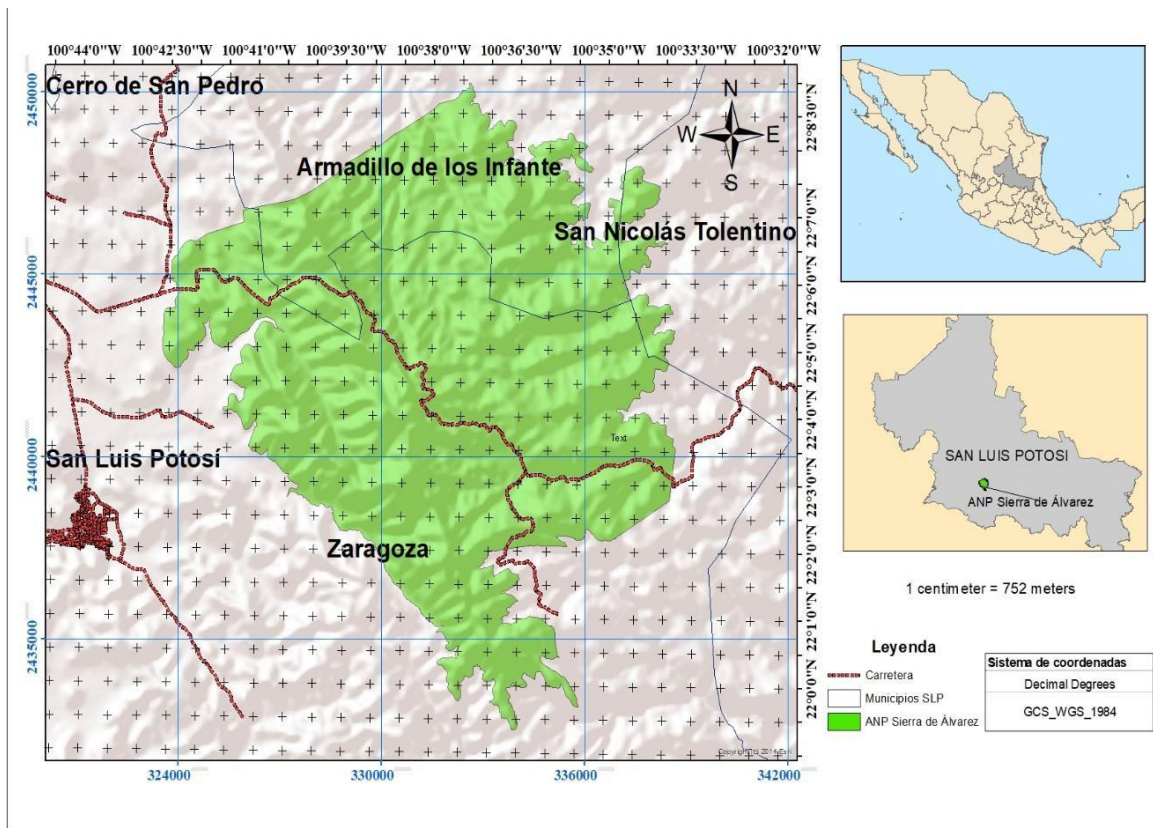


Figura 2. Mapa de ubicación ANP Sierra de Álvarez.

1.3. Caracterización climatológica

El estado de San Luis se caracteriza por su diversidad de climas, y, por ende, de la variedad de ecosistemas. Según la caracterización realizada por el INFyS estatal, el estado de San Luis Potosí existen 3 grupos de climas: A, B y C, y estos se reclasifican en 33 subtipos, lo que significa un amplio mosaico que en pequeñas porciones que varían desde el cálido subhúmedo y semicálido húmedo hasta los climas seco y muy seco semicálidos, los templados húmedo y subhúmedo y el semifrío subhúmedo, aunque estos últimos se encuentran en una superficie reducida (CONAFOR, 2014).

Dentro de la clasificación climática del estado de San Luis Potosí, la Sierra de Álvarez se encuentra ubicada en el subtipo “Semiseco templado” con clave BS1 kw, que se caracteriza por lluvias en verano, porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2, y verano cálido. En la sierra se registran dos periodos al año, el seco

de noviembre a abril, y el lluvioso de mayo a octubre; los meses de precipitación abundante coinciden con los de temperaturas más elevadas (Sánchez *et al.*, 1999) (Tabla 3).

Tabla 1 Características del clima (BSkw), tomado de (CONAFOR, 2014).

Clima	Subtipo climático	Temperatura media anual (°C)	Temperatura del mes más frío (°C)	Régimen de lluvia	Cociente de precipitación y temperatura	Porcentaje de lluvia invernal	Proporción de la superficie (%)
Grupo de clima B (Seco)	Semiseco templado (BSkw)	12 a 18	-3 a 18	Verano	> 22.9	5 a 10.2	11.94

1.4. Caracterización general hídrica del ANP

Los afluentes de agua que están dentro de los límites del ANP Sierra de Álvarez, hacen parte de 3 subcuencas, 2 de ellas pertenecen a la región hidrológica RH26 (Pánuco) una de las más importantes del país, la cual atraviesa el estado de San Luis Potosí. Las subcuencas son RH26Ch (Río Verde) con una participación del 71% y RH26Ci (Río Santa María Alto) con 23% y una pequeña parte que converge en la sección norte del área de estudio, participando con el 6.2% es la subcuenca RH37Gb (P. San José) que pertenece a la región hidrológica RH37 (El Salado), en el mapa (figura 3) se ilustra como se encuentran las regiones hidrográficas distribuidas de manera espacial.

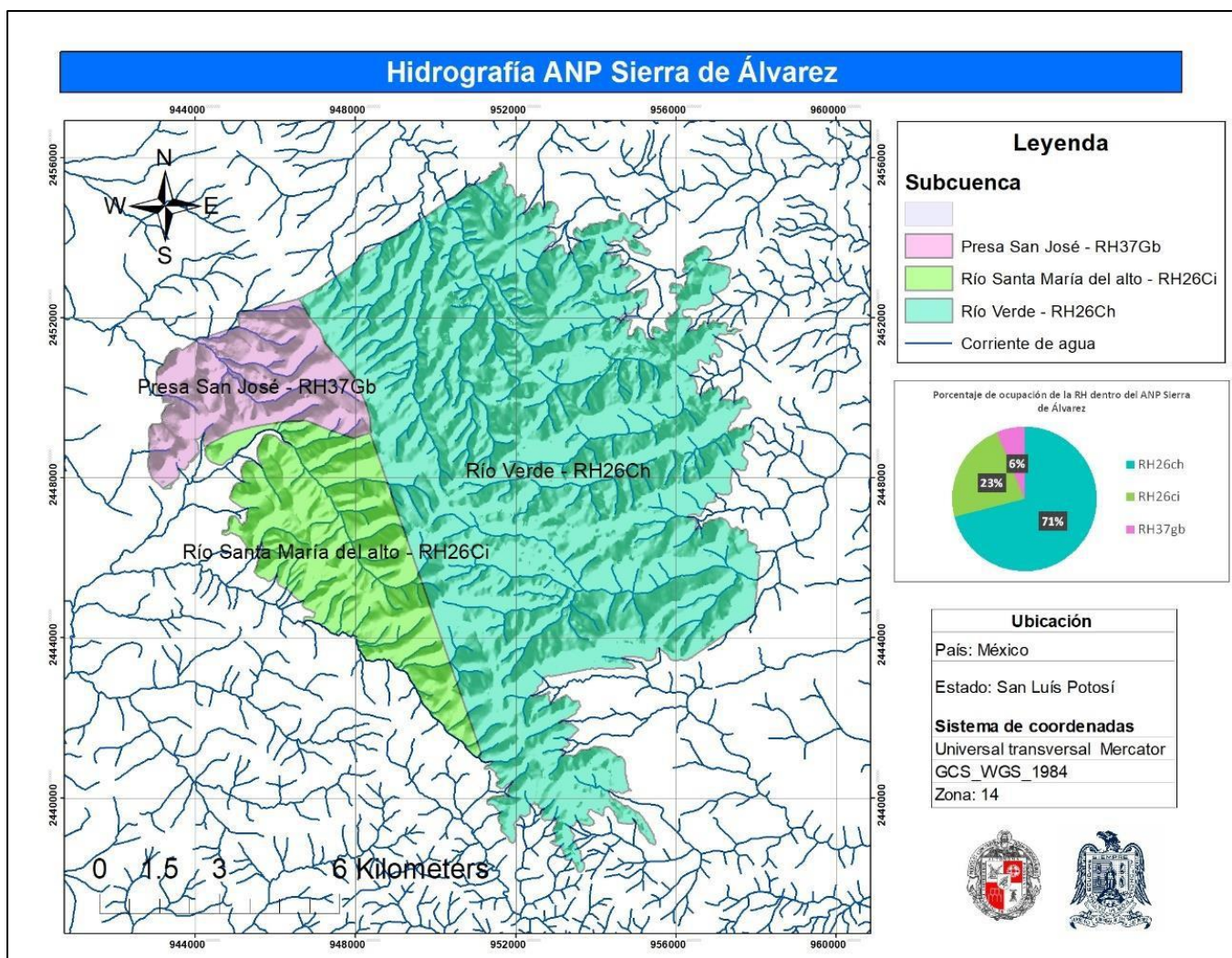


Figura 3 Caracterización Hidrológica ANP Sierra de Álvarez.

La Sierra Madre Oriental cruza el ANP y gracias a esta topografía de elevaciones abruptas nacen varios afluentes de agua, los cuales recargan las zonas más bajas, alimentando los ríos principales para el estado de San Luis Potosí. En la zona oeste en las subcuencas Río Verde que recibe aguas del río San Nicolás el cual pertenece a la subcuenca RH26Ch, atraviesa la planicie de la región Media, pasa por el lado norte de las poblaciones de Ciudad Fernández y Rioverde y cambia de dirección hacia el sureste en las cercanías de esta última (Castillo, 1997).

En la sección suroeste se encuentra abarcada por el río Santa María, el cual pertenece a la subcuenca RH26Ci (Río Santa María Alto). Este río atraviesa el municipio de Tierra Nueva y sale del territorio potosino, todavía en el Altiplano; recibe las aguas del río Bagres y continúa por Guanajuato para volver a San Luis Potosí mismo que sirve de límite entre Guanajuato y San Luis Potosí, el cual una vez penetrando a ese estado se une al río Pánuco y atraviesa la Sierra Madre Oriental. Al finalizar su recorrido vuelve con el nombre de río Tampaón por el norte de Aquismón y continúa por el sur de Ciudad Valles. Otros ríos que se benefician de aguas arriba del ANP son La Laja, Sta. Martha y el río Tamuín.

1.5. Caracterización general de la vegetación del ANP Sierra de Álvarez

Según la Información que proporciona el Sistema Nacional de Información y Gestión Forestal (SNIGF), el cual hace parte del estudio Inventarios Estatales Forestales y de Suelos (IEFyS), para el estado de San Luis Potosí, se presenta una clasificación forestal a través de las Cartas de Recursos Forestales con escala 1: 50.000, obtenidas a través de clasificación supervisada sobre imágenes RapidEye (2011-2012)¹. Para el área que comprende el ANP Sierra de Álvarez de las 12 clasificaciones de formaciones forestales que existen en el estado de San Luis Potosí 8 se encuentran en el sitio de estudio, estas son: Latifoliadas, Zonas áridas, Áreas no forestales, Otras áreas forestales, Zonas áridas, Coníferas, Coníferas y latifoliadas y estas se subdividen en 15 tipos de vegetación. La formación forestal con mayor proporción es Latifoliada con un 66.7% del total del área (figura 4).

¹ https://snigf.cnf.gob.mx/sanluispotosi/inventario_san_luis_potosi/

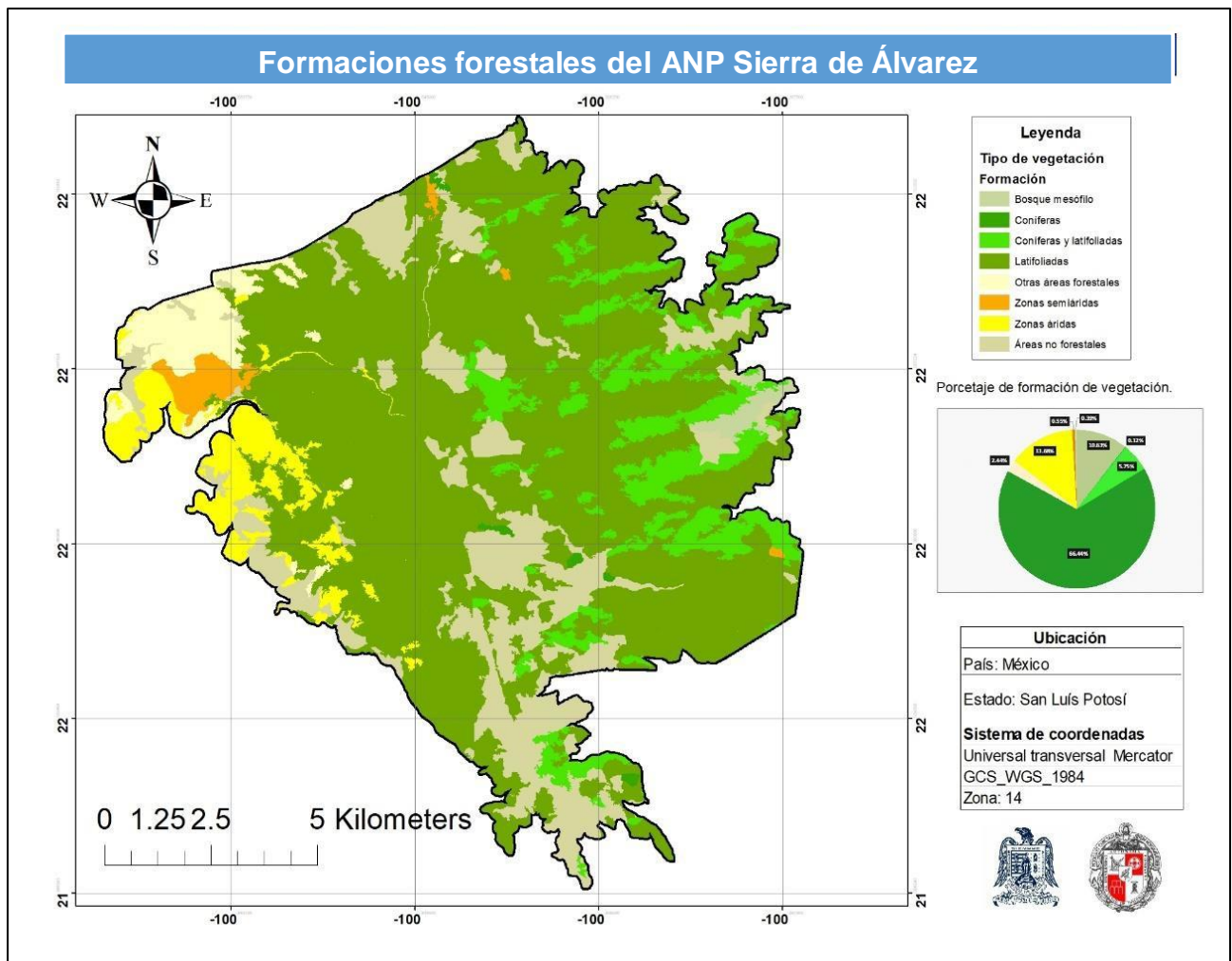


Figura 4 Mapa de clasificación forestal.

En el ANP existen varios asentamientos, los cuales le han dado el curso a los recursos forestales existentes, gracias a los distintos aprovechamientos económicos que se permiten en la zona, como lo son explotación de cantera y la ganadería. La actividad pecuaria se realiza en las áreas desmontadas y en el propio bosque, donde se sustenta ganado ovino, bovino y equino (Castillo *et al.*, 2008).

2. ESTIMACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE ÁLVAREZ

2.1. Recopilación teórica de la estimación de agua

2.1.1. Ciclo del agua

Ordoñez (2011) se refiere al ciclo hidrológico como un proceso de transporte recirculatorio e indefinido o permanente, en un sistema el cual las masas de agua y sus diferentes estados físicos y químicos se encuentran en constante cambios, este ciclo es causado por la energía proporcionada por el sol, la cual eleva el agua en forma de vapor denominado evaporación; la segunda, la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda (precipitación y escurrimiento) (figura 5).



Figura 5 Ciclo del agua, recuperado de: <https://www.arkiplus.com/el-ciclo-del-agua/>

El ciclo hidrológico se denomina global. Este sistema global se puede subdividir en tres: en un subsistema atmosférico, en un subsistema de agua superficial y en un subsistema de agua subterránea (Breña Puyol & Jacobo Villa, 2006). En cada uno de los subsistemas existe una capacidad y tiempo de almacenamiento.

Aunque se reconoce que es muy complejo determinar la cantidad de agua almacenada en cada una de las etapas del ciclo hidrológico.

2.1.2. Evapotranspiración:

En este proceso se disipa gran parte del calor que genera la radiación solar y es por medio del cual el agua líquida contenida en la superficie de la Tierra regresa a la atmósfera en forma de vapor. Éste es realmente un proceso invisible, ya que las nubes o neblina suspendidas en la atmósfera son en realidad gotitas de agua (o cristales de hielo) formadas al condensarse la humedad que contiene la atmósfera².

La palabra evapotranspiración está compuesta de dos partes ya que el proceso es la suma de: la evaporación del agua que está sobre todas las superficies mojadas y la transpiración de la vegetación (FAO, 1990).

Este proceso invisible es clave para la vida en nuestro planeta por dos razones principales. Primero, la transpiración de las plantas está ligada a la fotosíntesis, es decir, a la producción de biomasa a partir de CO₂ atmosférico y la luz del sol. En los poros microscópicos de las plantas llamados estomas sucede un intercambio gaseoso con la atmósfera: entra CO₂ y sale vapor de agua.

Las plantas transportan cantidades importantes de agua desde el suelo hacia la atmósfera al movilizarla hacia las hojas, donde se les escapa evaporándose, ya que sus estomas deben estar abiertos para capturar CO₂ del aire que requieren para producir su alimento².

2.1.3. Servicios ecosistémicos hídricos

Cuando se habla de servicios ecosistémicos, se refiere a los beneficios que recibe la sociedad por parte de los ecosistemas naturales ya sean económicos o ambientales y estos pueden ser diversos productos, materias primas, frutos, y empleo, entre otros; uno de los servicios más importantes es el servicio hídrico

² <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/996-evapotranspiracion-proceso-esencial-e-invisible>

ambiental, puesto que el agua es considerada como un recurso finito y vulnerable base para sostener la vida (Huerta y Jiménez, 2010).

El mantenimiento de los afluentes hídricos dentro de un sistema de conservación boscosa representa una mejor calidad de agua y la regulación de la recarga de los acuíferos, gracias al espesor boscoso que disminuye la escorrentía que afecta negativamente las posibilidades de almacenamiento de agua por lo que aumentando la infiltración a través del sistema radicular de las plantas³.

Bajo este contexto, la conservación de áreas naturales es un pilar importante para la gestión del recurso hídrico. En su gran mayoría, los estudios y análisis del servicio hídrico se realizan bajo el esquema de cuenca como unidad física básica, esto para efectos prácticos de la gestión integral. En este sentido, es de gran importancia la estimación y evaluación del comportamiento de los afluentes hídricos, y es medible como el concepto de disponibilidad de agua resultado de la capacidad que tienen los ecosistemas boscosos para captarla a través de los procesos biogeoquímicos con la regulación hidrológica (Fregoso, 2006).

La base de la gestión y la conservación para el mantenimiento y el beneficio económico de este servicio ecosistémico hídrico es el análisis y el estudio de la oferta y la demanda de agua para que este pueda ingresar en los distintos programas de PSA que existen. Se han realizado diversas metodologías que buscan la estimación de dicho recurso. De Groot *et al.* (2002) señalan que existen tres enfoques de valoración: ecológica, económica y cultural. Esta valoración se lleva a cabo a partir de índices, matrices ambientales, ponderaciones de productividad hídrica, balance hídrico etc. (Fregoso, 2006).

2.1.4. Balance hídrico

El balance hídrico se puede interpretar como la simulación más cercana de lo que corresponde en cantidades de agua al ciclo del agua, caracterizando de manera cuantitativa el movimiento y cambio de las masas agua en sistema,

³ <https://www.fao.org/3/a1598s/a1598s02.htm>

basándose en el principio de conservación (Tuñón *et al.*, 1999). El cálculo se puede realizar a partir de los valores de las entradas y salidas hidrológicas, evapotranspiración corregida, tomando en cuenta la precipitación media mensual. Los datos obtenidos en el balance hídrico sirven de base para la gestión integral, identificando el déficit entre la oferta y demanda del agua, predicción del riesgo en los cuerpos de agua, entre otros.

2.1.4.1. Métodos del balance hídrico superficial

Como se menciona anteriormente, el cálculo del balance hídrico se realiza a través de las diferencias entre las variables de entradas y salidas del sistema de ciclo hidrológico. La evapotranspiración (EPT), que es la consideración conjunta entre los procesos de evaporación y transpiración (Sánchez, 2015), y es una de las variables de salida más complicadas de estimar debido a que su cuantificación básicamente se realiza a través de métodos y modelos semi-empíricos (Ordoñez, 2011). Diferentes autores han planteado algunos métodos para la estimación de la evapotranspiración según los datos de las variables disponibles, comúnmente basadas en temperatura, esto con una aproximación aceptable. En la tabla se encuentran relacionados los métodos más relevantes para el cálculo del balance hídrico, sus autores y variables necesarias.

Tabla 2. Métodos de balance hídrico.

Método	Fórmula	Parámetros
Holdridge	$EPT_{\text{mensual}} = \frac{58,9 \cdot t_m \cdot N_{\text{daño}}}{N_{\text{daño}}}$	= Temperatura media mensual
Thornthwaite	$\left[\frac{EPT_{\text{mensual}}}{1000} \right]$	ETP mensual en mm/mes
	$\left[\frac{EPT_{\text{mensual}}}{1000} \right]$	*
Hargreaves	$\left(\frac{EPT_{\text{mensual}}}{1000} \right)$	Evapotranspiración potencial, mm/día Temperatura media diaria, °C Radiación solar, mm/día temperatura diaria máxima temperatura diaria mínima
Jensen- Heise	$\left(\frac{EPT_{\text{mensual}}}{1000} \right)$	Altitud del lugar (metros) -2,5-0,14() 6,108. exp [] t temperatura media min y max [] Radiación solar o tabla n numero de horas del sol reales (medidas con un heliógrafo) Número máximo teórico de horas de sol (tabla)
Turc	$\sqrt{\frac{EPT_{\text{mensual}}}{1000}}$	ETR Evapotranspiración real en mm/año Precipitación en mm/año L 300+25t+0,05 Temperatura media anual en °C
Cutagne	$ETR=P-X$	ETR Evapotranspiración real en metros/año P x Temperatura media anual en °C
Penman	$\frac{\left[\frac{RN}{P} \right]}{\left[\frac{RN}{P} \right]}$	RN Radiación neta CA Componente aerodinámico 0,26(es-ea)(1+0,54u) es Presión de vapor de saturación ea presión de vapor actual U Velocidad del viento en m/s (a 2m) Po Presión atmosférica media a nivel del mar (mb) P Presión atmosférica media en función de la altitud de la estación (mb) Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación en función de la temperatura Coeficiente psicrométrico

2.2. Estimación de la disponibilidad de agua a partir del balance hídrico superficial en el ANP Sierra de Álvarez.

2.2.1. Balance hídrico por el método Thornthwaite:

La segunda fase corresponde a la estimación de agua a través de balance hídrico, misma que se realiza en base a la evapotranspiración, por lo que se decide trabajar con el método Thornthwaite puesto que este se determina la evapotranspiración en función de la temperatura y de la latitud de la zona de estudio y del mes (obtención de número de horas-sol por día) (α) de la (ecuación 1). El método supone una región con vegetación verde, la evapotranspiración, en mm por mes de 30 días de 12 horas de duración.

$$\left(\frac{t}{5} \right)^\alpha \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

= evapotranspiración mensual en mm por mes de 30 días y 12 horas de duración.

= temperatura media mensual en °C

= $\sum i$: índice térmico anual

$$\left(\frac{t}{5} \right)^\alpha \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$$\alpha = \frac{t}{5} \quad q^6$$

2.2.2. Análisis de temperatura y precipitación

Para la aplicación de la ecuación de Thornthwaite se utilizaron los datos climatológicos de precipitación total mensual y temperatura promedio mensual, de 8 estaciones meteorológicas bajo el criterio de cercanía y disponibilidad de datos, las cuales permitieran solidez en la estimación. Las estaciones utilizadas se muestran en la tabla 3.

Los datos procesados en los cálculos de temperatura y precipitación corresponden a un periodo de 24 años que va desde 1980 a 2014, esto para generar promedios mensuales con menor error en la predicción y por la disponibilidad en los datos.

Tabla 3. Relación estación estaciones climáticas ANP Sierra de Álvarez

N°	Nombre	Municipio	Clave	Coordenadas
1	La salitrera	Zaragoza	24034	100°35'9.325"W 21°56'17.219"N
2	Armadillo de los Infante	Armadillo de los Infante	24004	100°39'18.669"W 22°14'48.677"N
3	Ojo Caliente	Santa María del Rio	24046	100°45'42.962"W 21°50'57.099"N
4	San Nicolás Tolentino	San Nicolás Tolentino	24071	100°33'6.579"W 22°14'54.331"N
5	Zaragoza	Zaragoza	24106	100°43'54.873"W 22°2'20.535"N
6	Santa Catarina	San Nicolás Tolentino	24177	100°27'24.151"W 22°3'9.362"N
7	Xoconoxtle	Zaragoza	24179	100°42'33.994"W 22°5'58.76"N
8	Golondrinas	San Nicolás Tolentino	24201	100°24'6.2"W 22°9'27.732"N

Se realizó un climograma con los datos promedio mensuales tanto de temperatura como precipitación (figura 6), siendo las variables determinantes para el cálculo de la evapotranspiración. En el climograma se observa un aumento de temperatura conforme aumenta la precipitación, esto comúnmente caracteriza a una zona del hemisferio norte. Las menores temperaturas se encuentran a partir del mes de noviembre hasta enero con un mínimo promedio de 12.6°C, durante el periodo de invierno con muy baja precipitaciones, y las temperaturas más altas en los meses de mayo a septiembre con un máximo promedio de 22.3°C, manteniéndose constante durante ese periodo.

En la zona llueve alrededor de 500 mm al año puesto que se encuentra en un clima seco, la mayor precipitación se tiene en el mes de septiembre, pero empieza a aumentar en el mes de mayo de manera exponencial hasta septiembre, el mes con el pico más alto de lluvias, luego para el mes de octubre descienden drásticamente conforme a la temperatura.

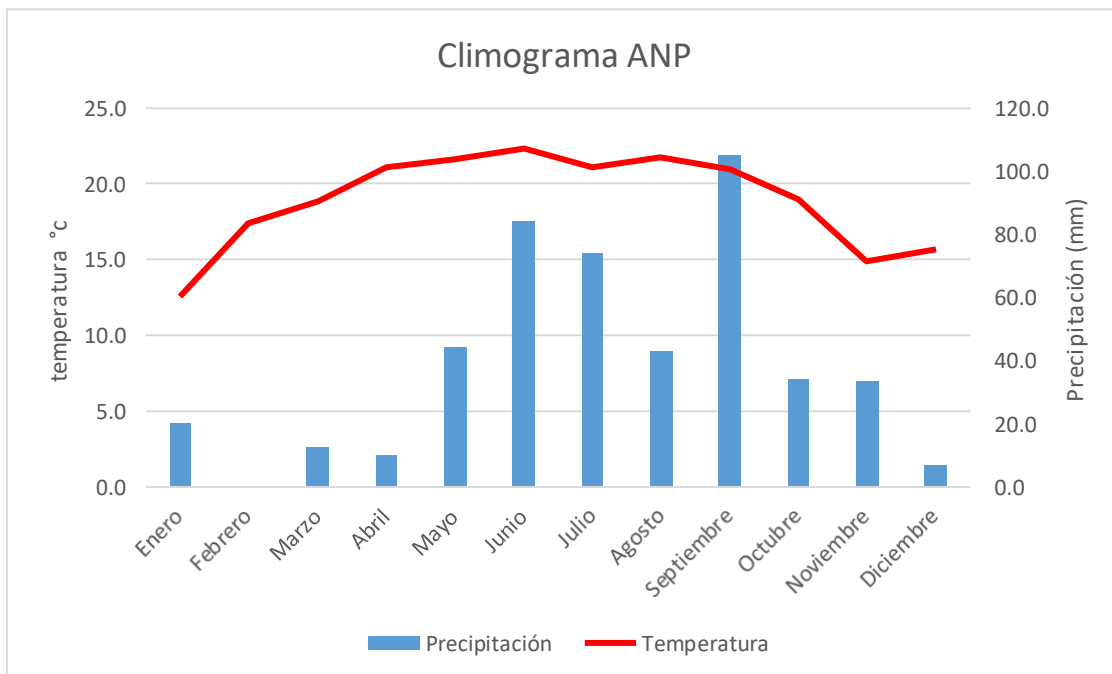


Figura 6. Gráfica Climograma del ANP.

2.3. Resultados de la estimación de la disponibilidad de agua

2.3.1. Cálculo de Evapotranspiración

La evapotranspiración está constituida por las pérdidas totales de agua, es decir la evaporación de la superficie evaporante más la transpiración de las plantas, y evapotranspiración potencial como lo definió Thornthwaite, es la pérdida total de agua en el suelo para uso de la vegetación en la creación de tejido, pero este es despreciable por lo que se toma igual que la evapotranspiración (Villón, s/f).

Para el cálculo de la evapotranspiración se promedió la temperatura media mensual y la precipitación total mensual de los años de 1980 al 2014 para posteriormente ser aplicadas en la fórmula de Thornthwaite, de lo cual resultó un total de hasta 900 mm aproximadamente de evapotranspiración en la zona, este resultado sobrepasa en un 55% la variable de entrada precipitación.

En la figura 7 se muestra el comportamiento de la evapotranspiración, en los meses de diciembre a marzo, aumentando exponencialmente llegando al pico más alto en mayo, luego comienza a descender en los meses de mayor precipitación como lo son de agosto a septiembre.

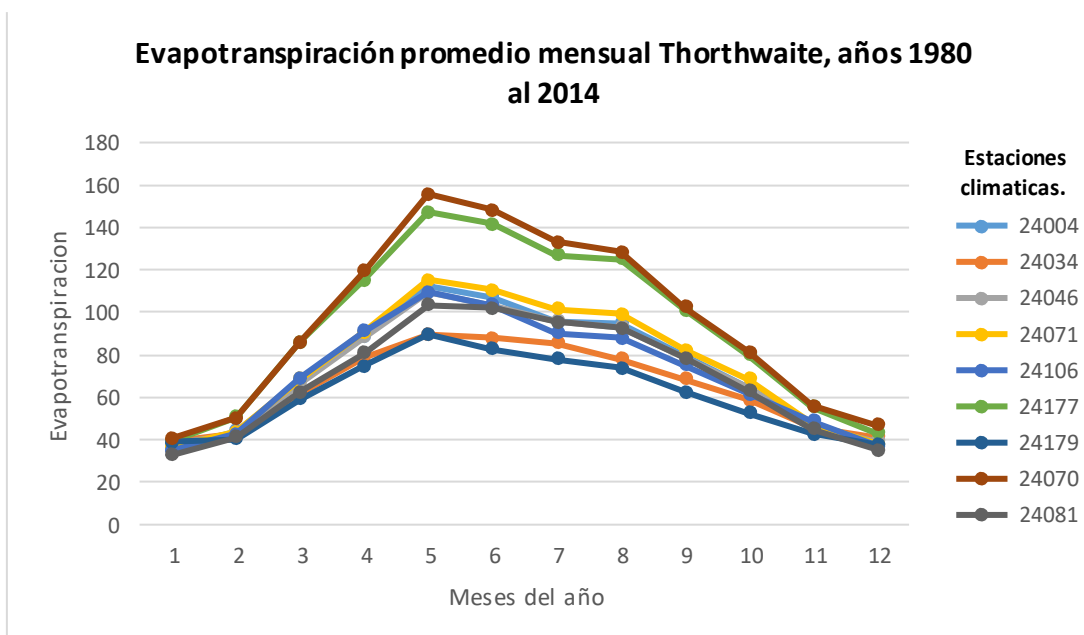


Figura 7. Gráfica de la evapotranspiración promedio mensual (1980-2014).

2.3.2. Cálculo del balance Hídrico:

El balance hídrico proporciona información sobre la cantidad en exceso o déficit de agua disponible en el área durante diferentes periodos, en este caso se observa de manera mensual para las estaciones climáticas analizadas, y esto resulta de la resta entre la precipitación (variable de entrada) y evapotranspiración (variable de salida).

Para el cálculo de balance hídrico se usó la herramienta de Office Excel mediante programación en macros, aplicando la fórmula a todos los promedios de datos de las estaciones climáticas bajo el método de Thornthwaite.

En la figura 8 se observa que existe un déficit de agua considerable entre los meses de febrero a junio, relacionado proporcionalmente con el aumento de la evapotranspiración, mientras que se estabiliza en agosto y aumenta la disponibilidad en septiembre.

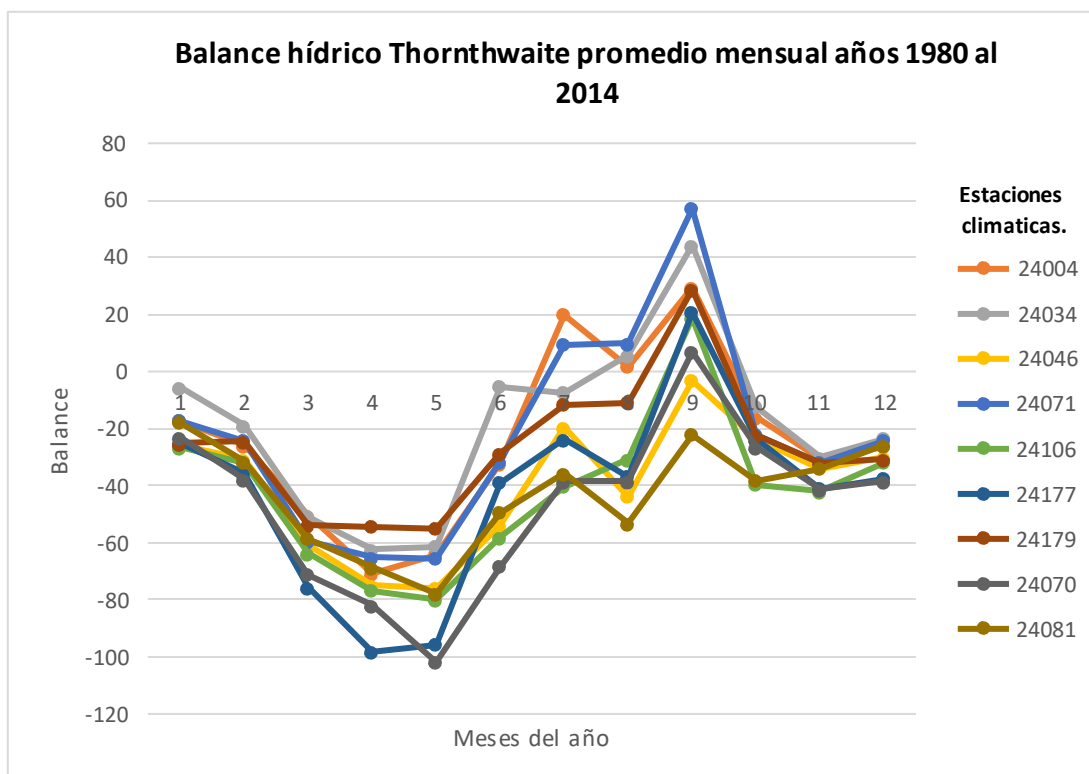


Figura 8. Gráfica Balance hídrico por estación climática.

De la misma forma, es posible identificar las diferencias significativas entre la precipitación y evapotranspiración para los meses de marzo y septiembre (tabla 4), dicha diferencia representa en un déficit de agua de aproximadamente -60 mm, y un recargo de 20 mm de agua en septiembre.

Tabla 4. Promedio de variables climáticas (marzo y septiembre).

Precipitación (mm)		Evapotranspiración (mm)		BH (mm)	
Marzo	Septiembre	Marzo	Septiembre	Marzo	Septiembre
9.23	101.07	69.75	80.97	-60.52	20.10

Las recargas y las pérdidas extremas que generan un déficit, el recargo de agua y la utilización de agua por el suelo, para lo cual se tiene en cuenta la capacidad de campo (CC) del suelo, considerando la clasificación edáfica del suelo de la zona de estudio la cual resultó de 250 según la tabla de (McDonald, 1979) en la cual se tiene en cuenta las características de dicho suelo tiene una capacidad de retención de agua.

El valor de capacidad de campo fue calculado en base a la homologación entre de los valores de la capacidad de retención del agua y los de profundidad radicular (Santillán *et al.*, 2013).

Se obtuvo aplicando la siguiente ecuación:

$$CC = CR * PR \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

CC: Capacidad de campo

CR: Capacidad de retención y

PR: Profundidad radicular de cierto tipo de vegetación.

En la gráfica de la figura 9 se observa un comportamiento similar al del climograma anterior. Se observa que las mayores pérdidas de agua se concentran en la época de invierno en la cual hay baja precipitación. Solo existe recarga y por lo tanto una reserva en septiembre puesto que existen en este las mayores precipitaciones, de esta manera no existe un exceso de agua debido a las características ecológicas de la zona de estudio.

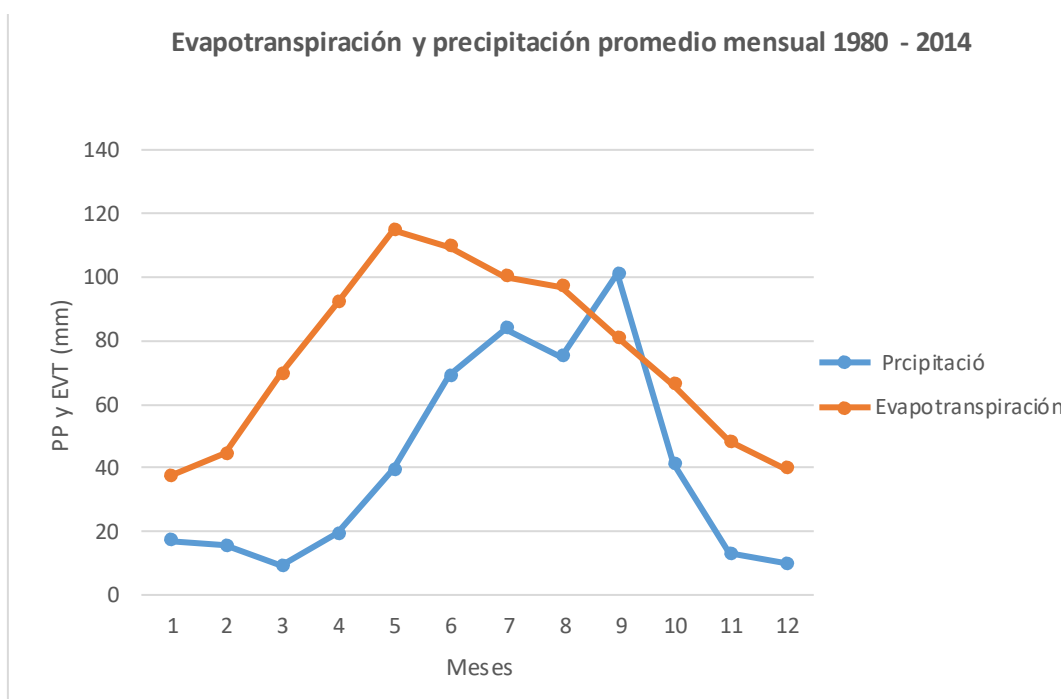


Figura 9 Gráfica Evapotranspiración vs precipitación.

En la gráfica (figura 10) se muestra la relación entre la variable de entrada y salida, puesto que el balance hídrico resulta de la resta entre la precipitación (variable de entrada) y evapotranspiración (variable de salida).

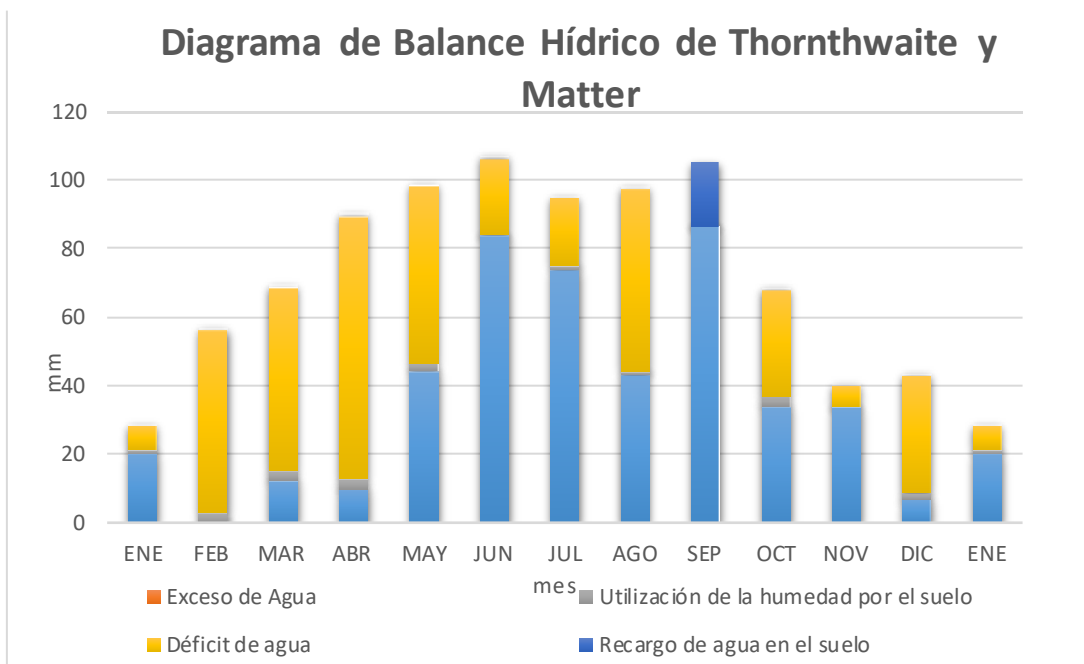


Figura 10 Gráfica Diagrama de balance hídrico.

2.3.3. Estimación espacial mediante interpolación

Para comprender y precisar el comportamiento del balance hídrico de manera espacial, se realizó una modelación de los datos obtenidos por estación climática para las dos épocas del año estudiadas. Las estaciones están distribuidas en el área de estudio. Los valores se extrapolaron a valores por hectárea y mediante el método IDW, ya que este es la mejor opción según distintos estudios en el ámbito para la interpolación climática.

Como resultado se muestra el mapa de interpolación de balance hídrico (figura 11), en el cual se identifica que para el mes de marzo existe un gran déficit de agua acentuándose en la parte Este del ANP Sierra de Álvarez; hacia el Oeste se estima también un déficit de hasta -57.6 mm/ha.

En el periodo de mayores precipitaciones (septiembre) no existe un déficit de agua, se mantiene en equilibrio y se calcula de un aproximado de hasta 55 mm/ha, lo cual indica la recuperación de la misma proporción pérdida en marzo, mostrándose la mayor proporción en la zona Este del área de estudio.

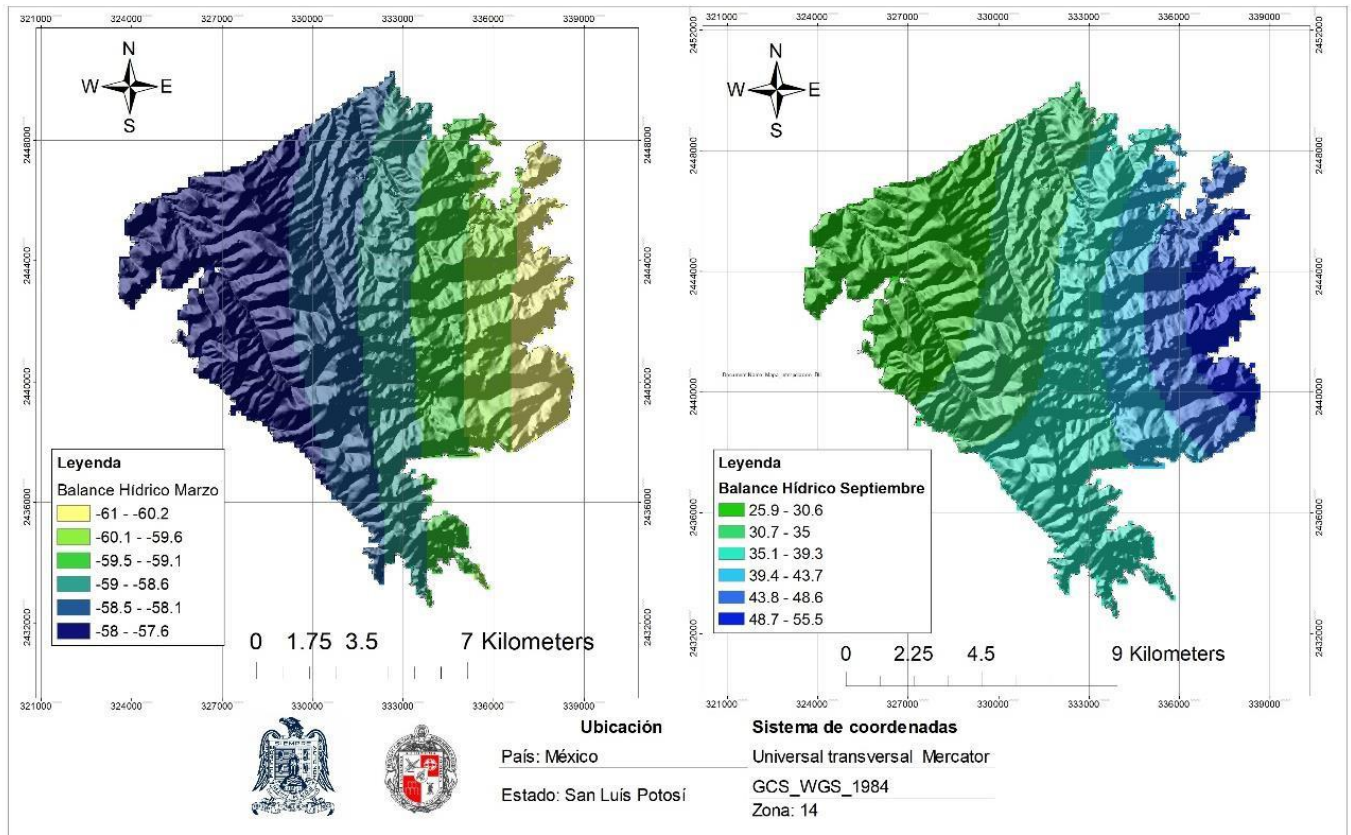


Figura 11 Mapa de interpolación de balance hídrico.

3. ESTIMACIÓN Y MODELACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE ÁLVAREZ

3.1. Recopilación teórica de estimación de biomasa y carbono

3.1.1. Biomasa forestal aérea:

El concepto de biomasa se define como la cantidad de materia orgánica que resulta a partir de la transformación natural o artificial. Para el caso de la biomasa vegetal la materia orgánica se clasifica en aérea que comprende el tronco, las hojas, las ramas y el follaje, y la biomasa contenida en las raíces es definido como biomasa de las raíces o subterránea, viva o muerta⁴ (figura 12).

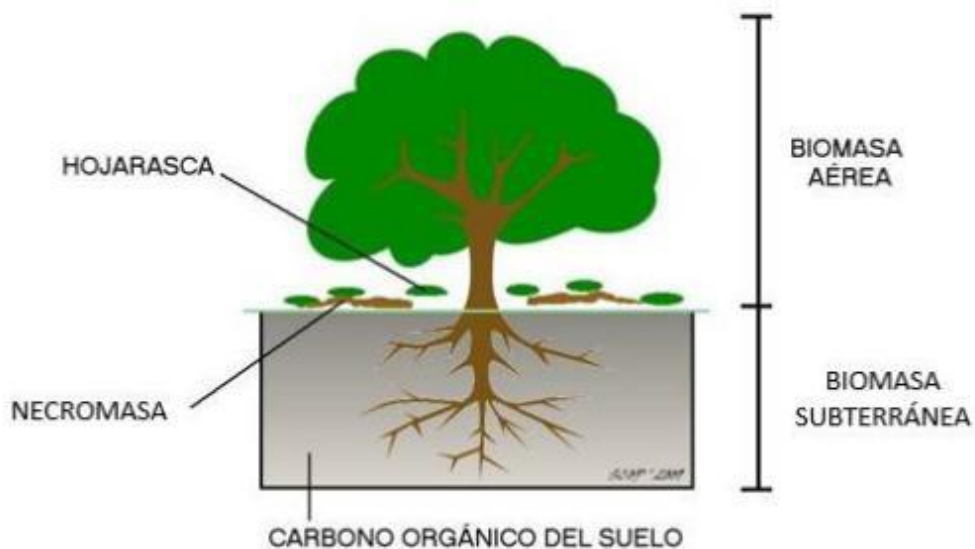


Figura 12 Disposición de carbono en plantas.

Tomado de:

<https://simef.minagri.gob.cl/bibliotecadigital/bitstream/handle/123456789/12931/CARBONO%20PROTOCOLO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

⁴ <https://www.fao.org/3/w4095e/w4095e04.htm>

El proceso de transformación en las plantas para la generación de biomasa es la fotosíntesis, que sintetiza sustancias orgánicas a partir del dióxido de Carbono (CO₂) del aire y de otras sustancias simples, aprovechando la energía del sol⁵.

La importancia de la estimación de la biomasa en zonas naturales es debido a los diferentes servicios ecosistémicos que este supone. Las características de vegetación determinan la cantidad de biomasa aérea y de esta se deriva del total del peso seco por unidad de área. Es una forma útil de cuantificar la cantidad de recurso disponible para todos los usos tradicionales (Brown, 1997), esto considerando las técnicas destructivas tradicionales para su cuantificación que sirven como base para relacionar de manera directa el peso bruto en biomasa con las medidas dasométricos y la especie de la unidad vegetal. Por medio de ecuaciones alométricas es posible llevar dicha relación de forma matemática y estimar el promedio de biomasa que esta pueda producir.

La importancia de la biomasa a parte de la bioenergética es que a partir de su estimación es posible conocer la cantidad de carbono forestal, el cual se afirma es el 50% de la suma del contenido en la biomasa aérea y subterránea (Ordoñez Díaz, 1999); (IPCC et al., 1996)

3.1.2. Los bosques y su participación en la captura de carbono

El elemento carbono (C) se encuentra en todos los organismos vivos, que obtienen como resultado de sus procesos metabólicos realizados durante su crecimiento y desarrollo, el cual es aprovechado cuando éstos mueren. Como anteriormente se menciona, se considera que aproximadamente el 50% del peso seco de cualquier organismo lo constituye este elemento, por lo que, debido a su abundancia, se torna importante en el mantenimiento de los ecosistemas (Smith *et al.*, 1993).

Uno de los principales servicios de los bosques naturales es su capacidad para la reducción de CO₂, uno de los gases más importantes en el efecto invernadero

⁵ <http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/biomasa.php>

y su aceleración en el cambio climático. Según el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por su siglas en inglés), la reducción es debido a la capacidad de captación de los árboles, que corresponde al transporte y separación del CO₂ a un lugar de almacenamiento convirtiéndose en biomasa, por lo que genera un aislamiento de la atmósfera a largo plazo (Bertz *et al.*, 2005).

Los árboles absorben el dióxido de carbono y parte de él se almacena como biomasa. Mientras el carbono forma parte de la estructura de un árbol (Lara, 2007) (Castillo, 1997).

Actualmente se ha incrementado la atención sobre el estudio de la dinámica de la captura de carbono entre el bosque y la atmósfera. Reconocer el papel que juegan los bosques en el ciclo global del carbono es de gran importancia en el tema de la mitigación de los GEI (Galeana-Pizaña *et al.*, 2013). Es por esta razón que las áreas de conservación representan una de las fuentes más importantes en la captación de carbono y es promovida o alterada por gestión del uso de la tierra, ya que la manipulación de estos sumideros de captura de carbono altera dicha capacidad. Es importante evaluar que tanta biomasa se genera y por lo tanto que tanto carbono se captura, esto es de suma importancia para la administración manejo sostenible de los bosques siendo la manera efectiva de almacenar carbono.

3.1.2.1. Flujo de carbono

El C circula entre la materia orgánica y el ambiente físico - químico de manera constante. El movimiento del C ocurre a diferentes escalas espacio - temporales, que pasa desde lo micro de manera molecular a lo macro en un contexto global. El C, en su unión molecular con el oxígeno, constituye el CO₂, gas resultante de procesos tanto geoquímicos como biológicos, y cuya presencia en la atmósfera es fundamental en la regulación de la temperatura del planeta debido a sus propiedades como gas efecto invernadero⁶.

⁶ <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/jaramillo.html>

Las plantas a través de sus estomas absorben el CO₂ atmosférico a través de difusión ingresando al proceso de fotosíntesis. Se incorpora en los tejidos vegetales, como hojas, raíces y tejido leñoso, y la otra mitad regresa a la atmósfera como CO₂ debido a la respiración autotrófica (figura 13).

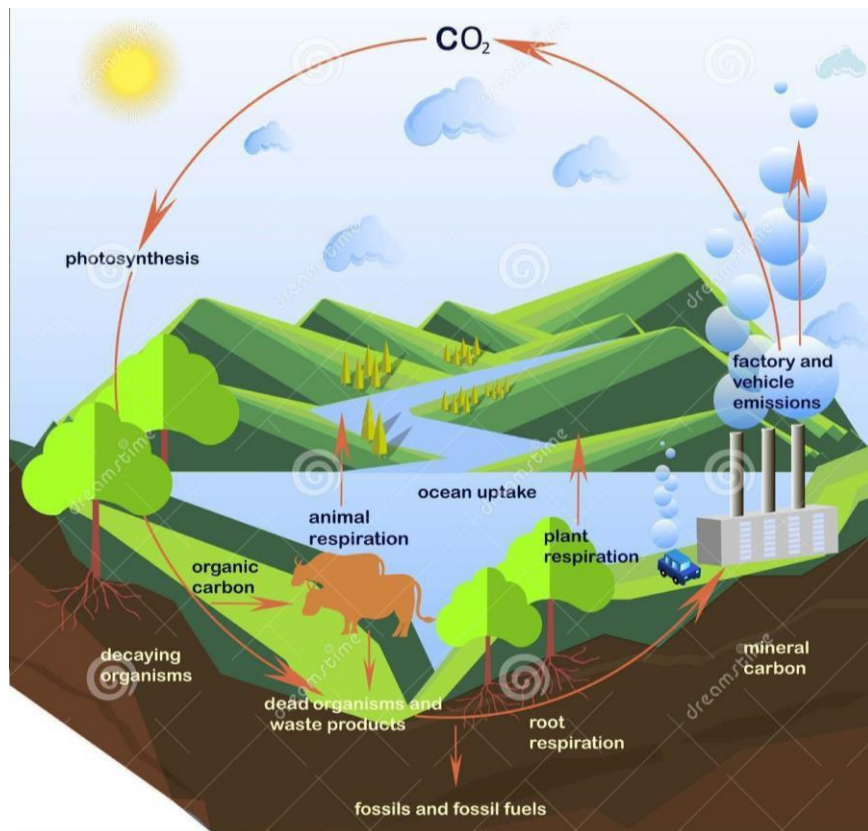


Figura 13 Ciclo del Carbono

Tomado de: <https://es.dreamstime.com/stock-de-ilustraci%C3%B3n-el-esquema-del-ciclo-de-carbono-planos-dise%C3%B1a-image94262568>.

3.1.3. Métodos para la estimación de biomasa y carbono

Como anteriormente se menciona, es de suma importancia la cuantificación de biomasa en los ecosistemas por las implicaciones benéficas que tiene la conservación de estos. Para dicha cuantificación se han desarrollado algunos métodos y estos están divididos en directos e indirectos. En el método directo es

realizado de manera destructivo, puesto que consiste en cortar el árbol y determinar la biomasa pesando directamente cada componente, y dentro de los métodos indirecto están: Ecuaciones alométricas, densidad media de biomasa, factor de expansión de biomasa, geoestadísticas, y la técnica de teledetección considerándose una forma de mejorar la precisión de la estimación de la biomasa forestal (Shi y Liu, 2017).

3.1.3.1. Estimación por modelos alométricos

Según Gayón (2000), la alometría es “la relación entre los cambios en la forma y el tamaño general”. Para el caso de los árboles es determinante el patrón de comportamientos entre sus componentes. La relación matemática es expresada de la forma “ $Y=aX^b$ ”, donde la variable biológica Y (Biomasa) depende de la masa del cuerpo X (mediciones dasométricas) a través del exponente de escalamiento b y de una constante a que es característica de la clase de organismo.

Lo anterior es la relación alométrica que se basa en el árbol estudiado y medido, el cual busca estimar la biomasa de la vegetación como modelo matemático llegando a construir la denominada ecuación alométrica de biomasa (Shi y Liu, 2017).

3.1.3.2. Teledetección en la estimación de biomasa y carbono

Actualmente, este método se ha convertido en uno de los principales de estimación de la biomasa forestal y las reservas de carbono a gran escala. Las tecnologías de sensores permiten el monitoreo de la superficie terrestre de la distribución de áreas forestales, en las que se pueden evaluar propiedades físicas y bioquímicas del ecosistema captado.

Los datos se pueden derivar de dos tipos de sensores: el pasivo y el activo (Sousa *et al.*, 2017). En el primero se detecta la radiación electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales descomponiéndose en varias longitudes de onda, cada una de ellas se envía a un conjunto de detectores sensibles a esa región del espectro que la amplifican y la convierten en señal eléctrica y

finalmente en un valor numérico conocido como Nivel Digital (ND). Y en el segundo poseen fuentes internas que generan artificialmente la radiación (radar) (Chuvienco, 1995).

En las imágenes satelitales, la vegetación tiene diferentes interacciones con rangos específicos del espectro electromagnético, especialmente las regiones rojas (R) e infrarroja cercana (NIR), debido a la actividad fotosintética de las hojas y, por lo tanto, de la biomasa. Para la estimación de la biomasa se utilizan varios métodos, el más frecuente es el análisis de regresión utilizando datos de biomasa del inventario forestal y datos ND comúnmente operando las bandas y calculando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) (Sousa *et al.*, 2017).

3.1.3.2.1. Índice de vegetación normalizado (NDVI)

Este índice es uno de los más conocidos que se utilizan para estimar la biomasa de la vegetación verde mediante la mejora de las diferencias de reflectancia de la clorofila en la relación de reflectancia del rojo y del infrarrojo cercano (ecuación 4) (Bhardwaj *et al.*, 2016).

Se calcula con la siguiente expresión de bandas:

$$\frac{Luz\ infrarrojo\ cercano - Luz\ roja\ visible}{Luz\ infrarrojo\ cercano + Luz\ roja\ visible} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

Luz infrarroja cercana

= Luz roja visible.

El NDVI se determina comparando matemáticamente la cantidad de luz roja visible absorbida y la luz infrarroja cercana reflejada, esto sucede debido a que el pigmento de clorofila en una planta sana absorbe la mayor parte de la luz roja visible, mientras que la estructura celular de una planta refleja la mayor parte de la luz infrarroja cercana, lo que significa que una alta actividad fotosintética, comúnmente asociada con vegetación densa y sana, tendrá menos reflectancia

en la banda roja y mayor reflectancia en el infrarrojo cercano (Yengoh *et al.*, 2015).

Los valores de NDVI oscilan entre -1 y +1. Cuando está cerca de +1 indica abundancia de la vegetación o vegetación sana dando por hecho alto contenido de clorofila. Por ejemplo, un área de bosque resulta en un NDVI más cercano a +1 en comparación con un valor 0 para el desierto, por lo que los valores <0 indican suelo desnudo, agua o vegetación muerta (Ceroni *et al.*, 2015).

3.1.3.2.2 Imágenes satelitales Landsat 8 OLI

Las imágenes Landsat 8 OLI pertenecen al programa ERTS (Earth resource technology satellite), creado por la agencia espacial norteamericana, para la observación de recursos terrestres. Su primer satélite fue lanzado el 23 de julio de 1972. Esta familia fue denominada Landsat a partir del segundo lanzamiento en 1975 y que en la actualidad ha sido de los más exitosos (Chuvienco, 1995).

La misión Landsat 8 (anteriormente Landsat Data Continuity Mission, LDCM), es una colaboración entre la NASA y el Servicio Geológico de EE. UU. Sus características hacen de estas imágenes propicias para estudios de planificación y el monitoreo del uso de la tierra en escalas regionales a locales, el apoyo a la respuesta y las evaluaciones de desastres, y el monitoreo del uso del agua. Las mediciones de Landsat 8 sirven directamente a la investigación de la NASA en las áreas de enfoque del clima, el ciclo del C, los ecosistemas, el agua. ciclo, biogeoquímica y superficie / interior de la Tierra.

Landsat 8 consta de dos instrumentos científicos: Operational Land Imager (OLI) y el sensor infrarrojo térmico (TIRS). El sensor OLI mide en las porciones del espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Sus imágenes tienen resoluciones espaciales pancromáticas de 15 m y multiespectrales de 30 m a lo largo de una franja de 185 km de ancho. La Tierra está a la vista una vez cada 16 días debido a la órbita casi polar del Landsat 8. OLI proporciona dos nuevas bandas espectrales con respecto al instrumento Landsat 7 ETM +, una

diseñada especialmente para detectar nubes cirros⁷. En la tabla 5 se describen las características de las bandas de las imágenes Landsat 8 OLI.

Tabla 5 Características de las bandas imagen Landsat 8 OLI

Banda No.	Nombre de banda	Rango espectral (nm)	Uso de datos
1	Nuevo Deep Blue	433-453	Aerosoles / zona costera
2	Azul	450-515	Pigmentos / dispersión / costero
3	Verde	525-600	Pigmentos / costeros
4	rojo	630-680	Pigmentos / costeros
5	NIR	845-885	Follaje / costero
6	SWIR 2	1560-1660	Follaje
7	SWIR 3	10,4-12,5 (TIR)	Estrés por calor de la planta, mapeo térmico, mapeo de suelos
8	SARTÉN	500-680	Nitidez de imagen
9	SWIR	1360-1390	Detección de nubes cirros

3.1.3.2.3 Modelación

Por medio del modelado espacial es posible tener un acercamiento o estimar la realidad de algún fenómeno que presente un territorio, comúnmente se realizan proyecciones analizadas a través de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Teledetección (Arancibia, 2008).

Dentro de la modelación existen dos metodologías importantes ampliamente utilizadas para la estimación de biomasa, las cuales son el álgebra de mapas e interpolación.

⁷ <https://earth.esa.int/eogateway/instruments/oli-landsat-8->

- **Álgebra de mapas:** Es un conjunto de operadores, y cada operador constituye un componente del sistema de información que transforma una serie de entradas de información en una serie de salidas.
- **Interpolación:** Este método tiene como objetivo estimar, a partir de un procedimiento matemático predecir el valor de un atributo en una locación precisa a partir de datos, valores de Z para un set de puntos (X,Y). La interpolación puede utilizarse para funciones como estimar valores de Z para ubicaciones particulares (X,Y), transformando un número finito de observaciones, que se han obtenido en base a ubicaciones geográficas precisas, a un espacio continuo de manera que el patrón espacial presentado por las observaciones puntuales; También estimar valores de Z para una cuadrícula rectangular; o cambiar la resolución de la cuadrícula en un archivo ráster (método conocido como remuestreo) (Fallas, 2007),

Existen varios métodos de interpolación en materia ambiental y fenómenos naturales, y se diferencian en sus propiedades, perspectiva local o global, además de naturaleza determinística o estocástica dentro de los más utilizados se destacan Inverso de la distancia Ponderación de Distancia Inversa (IDW) por sus siglas en inglés y Krigeaje (Kriging).

3.1.4 Inventario Nacional Forestal y de Suelo INFyS

Los inventarios forestales son realizados periódicamente en los países en busca del conocimiento en el comportamiento de los ecosistemas terrestres a partir del inventario de sus recursos forestales, además de ser la base de políticas ambientales y de la planificación del manejo del recurso forestal. Para muchos investigadores la información de estos inventarios sienta la base del cálculo de la biomasa de manera generalizada a partir de patrones de comportamiento. Para realizar este monitoreo existe una metodología base (medidas dasométricas) en cuanto a la medición de los individuos, en unos de la geoestadística es indispensable en estas actividades

En México, la entidad encargada de recabar la información del INFyS es la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), el primer inventario comenzó a partir del año 2004 y con la culminación del primer ciclo de inventario 2004-2009, marca la pauta para un programa de inventarios forestales con una metodología homogénea y una actualización periódica, establecida cada cinco años, con ello, se da continuidad al segundo ciclo de muestreo en 2009 culminando en el 2014 el cual es el más actualizado (CONAFOR, 2014).

3.1.4.1 Metodología del INFyS en México

Para obtener la información en campo se genera un diseño estratificado sistemático por conglomerados en dos etapas. En la malla de muestreo se ubican conglomerados o Unidades de Muestreo Primarias (UMP) que, desde el punto de vista conceptual, representan una parcela de una hectárea. En estos conglomerados se evalúan cuatro sitios o Unidades de Muestreo Secundarias (UMS), dispuestos geométricamente en forma de “Y” invertida con respecto al Norte, estas son circulares en el caso de bosques y vegetación de zonas áridas, y rectangulares en selvas. En estos sitios se recaba la mayor parte de la información dasométricas de los ecosistemas y de caracterización de los tres estratos vegetales de composición que son: arbóreo, arbustivo y herbáceo, como se muestra en la (figura 14).

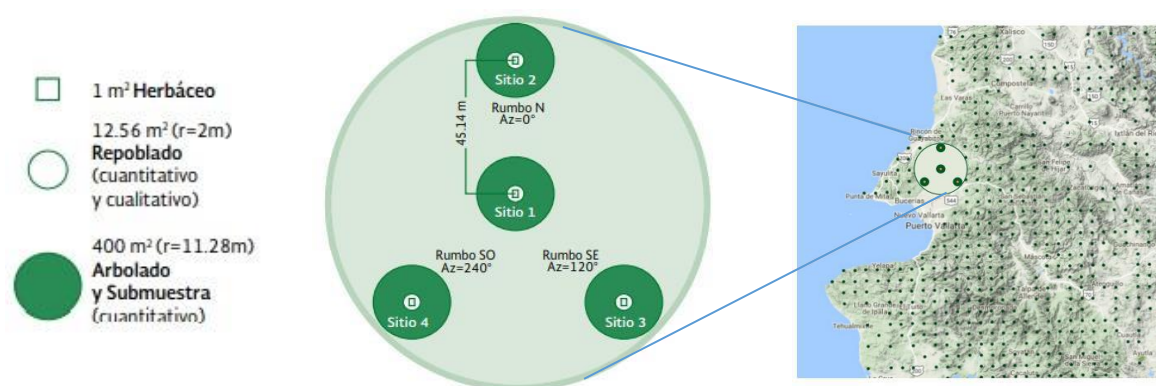


Figura 14. Forma y distribución de las unidades de muestreo secundarias (UMS) o, adaptada del IEFyS San Luís Potosí, 2014.

3.2. Resultados de la estimación de biomasa aérea y C en el ANP

3.2.1. Cálculo de biomasa aérea y C con modelos alométricos

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar volumen de biomasa y C de un individuo, en función de la dimensión de algunas de sus partes tales como el diámetro del tronco a la altura del pecho (DAP) y/o la altura total, correlacionados con el tamaño total del individuo (Morfín *et al.*, 2015). La información necesaria para la recolección de las variables de dichos modelos es recabada en inventarios forestales.

La base de datos utilizada para el cálculo de biomasa fue INFyS estatal, el cual cuenta con una malla de puntos georreferenciados (conglomerados) que contienen información del inventario realizado entre los años 2009 y 2014 en el estado de San Luís Potosí. Se extrajeron los conglomerados que abarcan la zona de estudio de lo cual resultaron 12 con un total de 1029 individuos muestreados (figura 15). Sobre esta información se procesaron las fórmulas de modelos alométricos correspondientes para cada especie de árboles identificada. Aquellos árboles que no estaban identificados se les asignó la biomasa promedio ponderada calculada en el conglomerado al cual pertenecen.

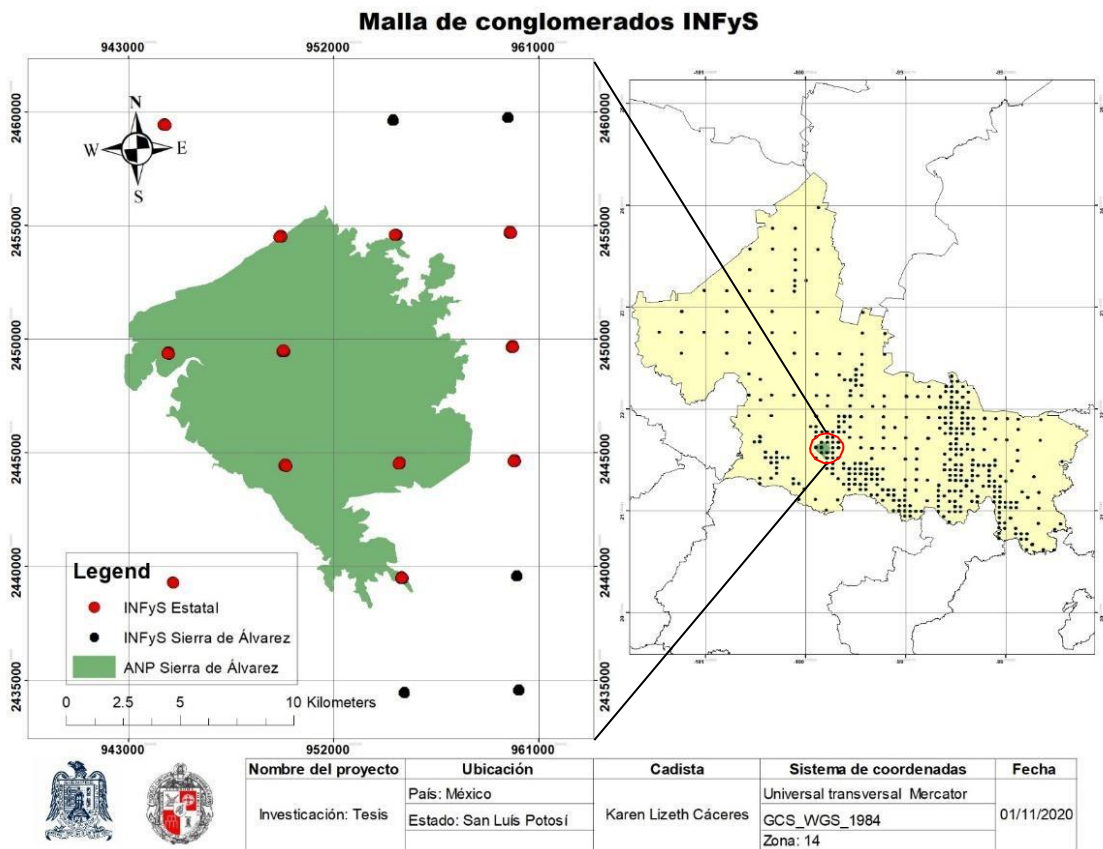


Figura 15. Malla de conglomerados de muestreo INFyS.

Las fórmulas de los modelos alométricos fueron obtenidas de la plataforma *AloMéxico*, creada a través de la biblioteca digital del Centro Mesoamericano para el Intercambio de Conocimientos y Experiencias Forestales, el cual tiene como finalidad la recopilación y preservación de la producción científica y de divulgación (CMICEF, 2012). Se realizó una filtración de los datos y se seleccionaron los modelos más convenientes según la literatura por especie identificada, es decir que la ecuación predeterminada perteneciera a un individuo de muestra en características ambientales lo más parecida posibles a las especies encontradas en la zona de estudio del presente trabajo (Tabla 6), y a partir de este se obtuvo la biomasa.

Tabla 6. Ecuaciones alométricas para especies arbóreas del ANP.

Nombre científico	Ecuación alométrica
<i>Arbutus xalapensis</i>	$B = 0.3764 * DN^{-2.3146} * DN^{-1.9106}$
<i>Cupressus arizonica</i>	$0.5266 * X^{1.7712}$
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	$B = -1.01076 + 0.045154 * H + 0.009052 * \ln(DN) + 0.016343 * Z * X^2 + 0.06316 * \ln(H * DN^2)$
<i>Flourensia laurifolia</i>	$B = 811 * 3.1416 * DC1 * DC2 * H$
<i>Juglans mollis</i>	$B = 10^{-1.417} * X^{2.755}$
<i>Juniperus flaccida</i>	$B = \text{Exp}(-1.6469) * DN^{2.1255}$
<i>Opuntia hyptiacantha</i>	$B = 10^{-0.8092} * (0.3 * AB * H)^{0.8247}$
<i>Prosopis juliflora</i>	$B = 0.127 * DN^{2.161}$
<i>Quercus</i>	$B = 0.092 * DN^{2.448}$
<i>Quercus castanea</i>	$B = 0.0416 * DN^{2.7154}$
<i>Quercus crassifolia</i>	$B = 0.283 * (DN^2 * H)^{0.807}$
<i>Quercus mexicana</i>	$B = 0.089 * DN^{2.5226}$
<i>Quercus obtusata</i>	$B = 0.0333 * DN^{2.6648}$
<i>Quercus rysophylla</i>	$B = 0.0416 * DN^{2.7154}$
<i>Yucca</i>	$B = -40,102 + 1.787 * DN + 10.182 * H$

Variables: B: Biomasa (kg), DN: Diámetro normal (cm), H: Altura total (m), DC: Diámetro de copa (m), AB: Área basal (m).

Los resultados de biomasa aérea obtenida con las ecuaciones alométricas, aplicadas al registró total de 1029 árboles distribuidos en 12 conglomerados, en las 16,900 ha. Se obtuvo un aproximado en biomasa aérea de 103.15 Mg. En la figura 15, se relacionan la cantidad de biomasa por tipo de vegetación identificado en el INFyS para el ANP Sierra de Álvarez, y de C que corresponde al 0.5 de la biomasa, con un estimado de 51.58 t.

Las mayores concentraciones de biomasa y C se encuentra en el tipo de vegetación “Bosque encino” con un 75.5% del total calculado para la zona. En esta vegetación predominan las familias arbóreas: Fagaceae, Cactaceae, Cupressaceae, Fabaceae, Juglandaceae. Las menores concentraciones se encuentran representadas por la clasificación “Matorral crasicaule” con menos del 1% del total de biomasa y C en la zona.

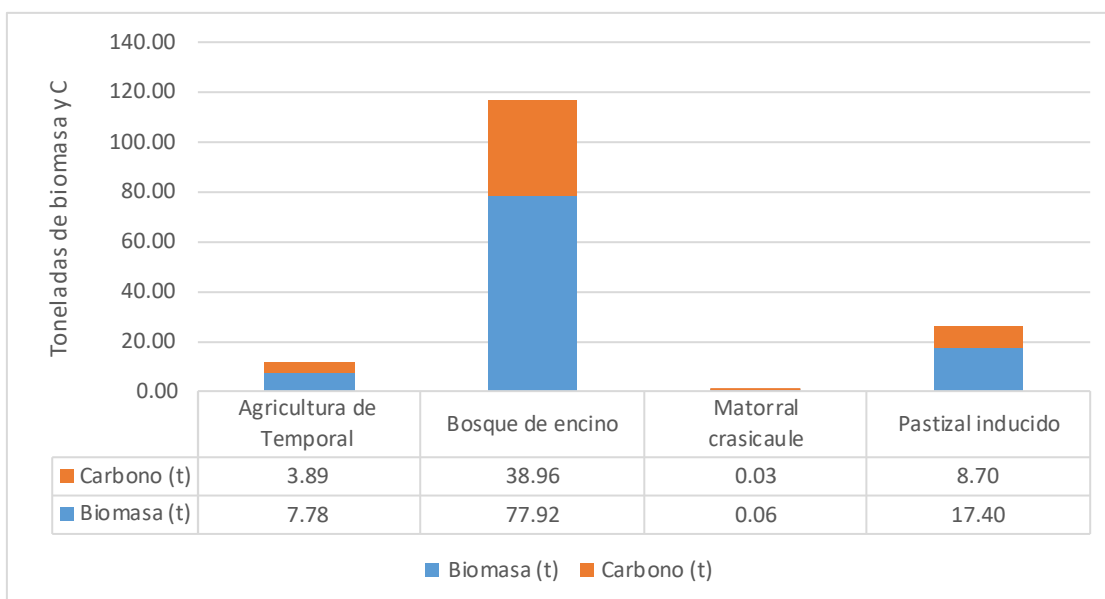


Figura 16. Gráfica Cantidad de Biomasa y Carbono en el ANP

3.2.2. Índice de vegetación normalizado NDVI

3.2.2.1. Preprocesamiento de imágenes

Previo al análisis de las imágenes y la estimación de los índices es importante realizar la corrección de las imágenes a trabajar. Este paso fue realizado en el software ENVI 3.5, en el cual se procedió con una corrección atmosférica que permitió quitar o suavizar vapor de agua presente en la imagen de la zona de estudio, además de que permite convertir la información de la imagen original (bruta) de cada píxel, de Niveles Digitales (ND) a Niveles de Reflectancia captada por el sensor en la atmosfera (Emilio Chuvieco, 1995). Las imágenes fueron obtenidas de la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés). En la figura 17 y 18, se observa la imagen que pertenece al cuadrante path 27, row 45, para el periodo seco y húmedo es decir marzo y septiembre respectivamente, y en la tabla 6 se muestra la información satelital de dichas imágenes.

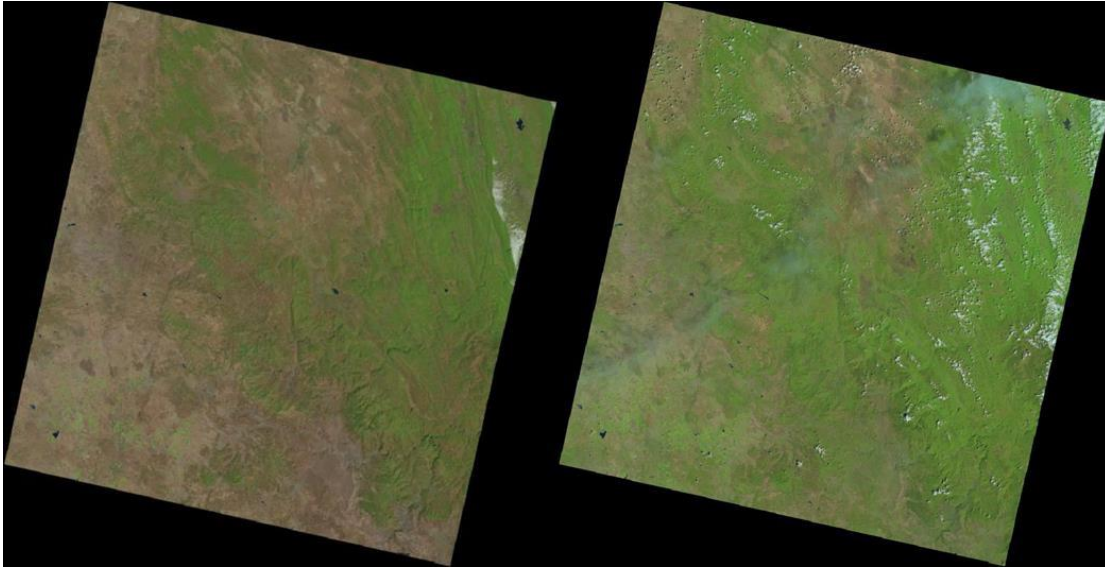


Figura 17. Imagen Landsat 8 OLI (marzo, 2014)

Figura 18. Imagen Landsat 8 OLI (septiembre, 2014)

Atributo del conjunto de datos	Valor de atributo (marzo)	Valor de atributo (septiembre)
Identificador de producto Landsat L1	LC08_L1TP_027045_20140311_20200911_02_T1	LC08_L1TP_027045_20140919_20200910_02_T1
Identificador de escena Landsat	LC80270452014070LGN01	LC80270452014262LGN01
Fecha de adquisición	11/03/2014	2014/09/19
Categoría de colección	T1	T1
Ruta WRS	027	027
Fila WRS	045	045
Fecha de generación del producto L1	2020/09/11	10/09/2020
Tipo de datos L2	OLI_TIRS_L2SP	OLI_TIRS_L1TP
Identificador de sensor	OLI_TIRS	OLI_TIRS
Satélite	8	8
Proyección del mapa del producto L1	UTM	UTM
Zona UTM	14	14

Dato	WGS84	WGS84
Centro de escena Lat DMS	21 ° 40'17.65 "N	21 ° 40'18.62 "N
Latitud del centro de escena	21.67157	21.67184

Tabla 7. Información satelital de las imágenes Landsat 8

En la figura 19 se observan los resultados de las imágenes corregidas para cada periodo, identificando los cambios en el mejoramiento de las imágenes, de manera que se define con mayor precisión las variables biofísicas de la zona de estudio.

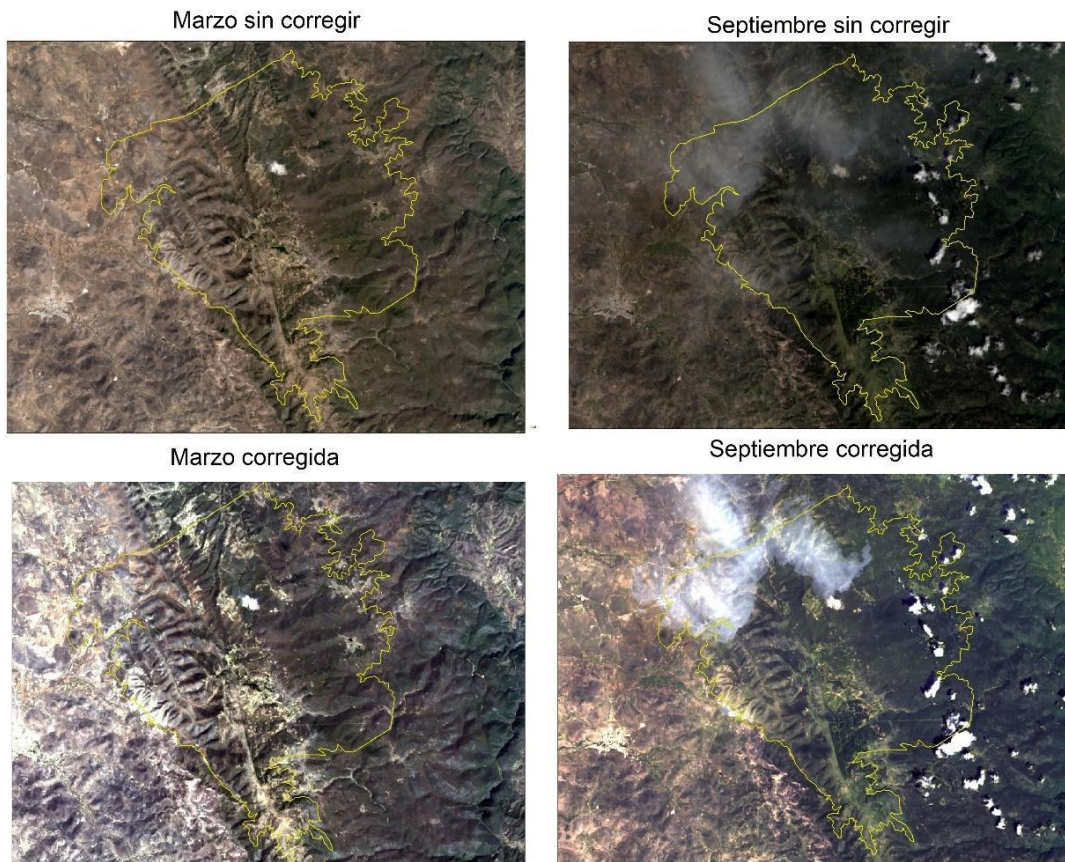


Figura 19. Corrección de imágenes Landsat 8 OLI.

3.2.2.2. Cálculo del NDVI

Con las imágenes corregidas se realizaron los cálculos de NDVI para los meses de marzo (con menores precipitaciones) y septiembre (mayores precipitaciones), utilizando el software ENVI 5.3, esto, para posteriormente realizar el cálculo de C, siendo la variable espacial necesaria en la correlación de la biomasa estimada. Para lo anterior se utilizaron las imágenes Landsat 8 OLI operando sus bandas de manera algebraica, de acuerdo con la fórmula de NDVI. El NDVI ayuda a diferenciar la vegetación de otros tipos de cobertura del suelo (artificial) y determinar su estado general.

En la figura 20 se observa la relación entre los valores de NDVI con el tipo de vegetación que caracteriza cada rango.

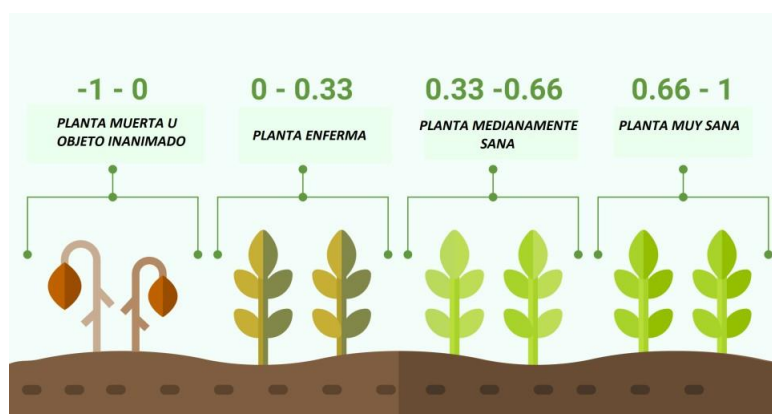


Figura 20. Escala de valores NDVI. Tomado de: <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>

Para el caso de estudio la imagen el NDVI se representa en escala de grises, de tal manera que los tonos más claros representan los valores mayores, acercándose a 1, y los colores oscuros representan valores cercanos a cero (figura 21).

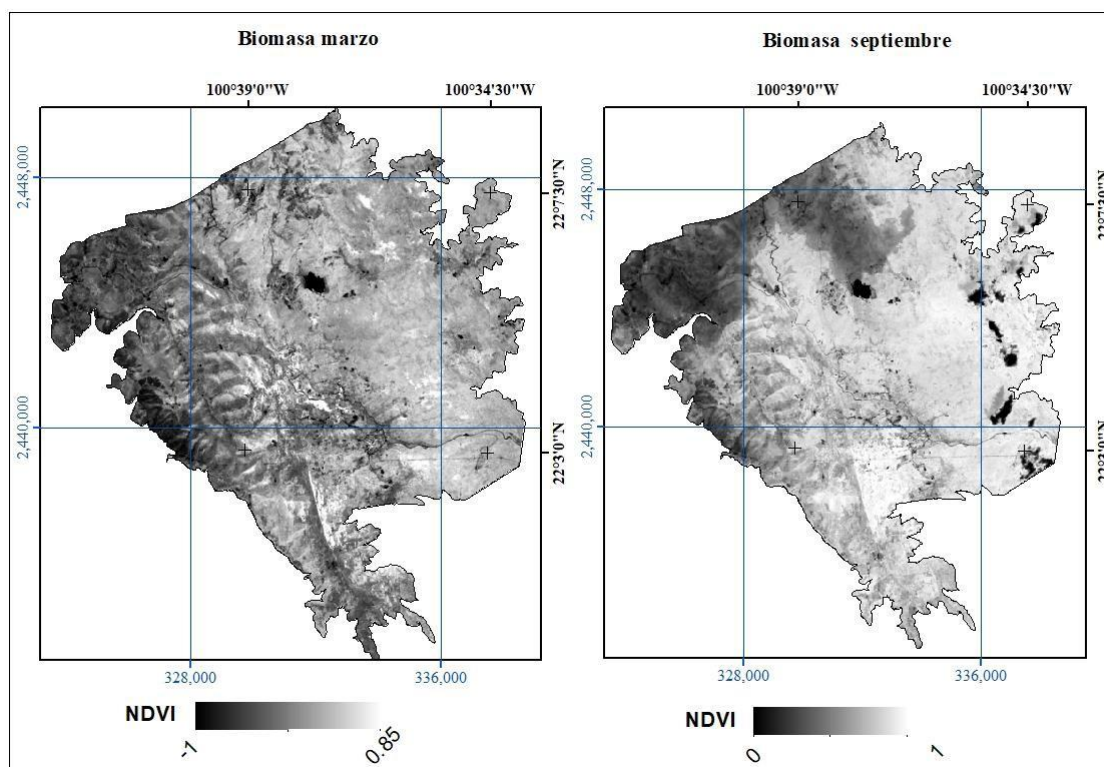


Figura 21. Mapa NDVI (septiembre y marzo) del ANP.

En el mapa se puede observar que para septiembre su valor máximo es de 1, lo que corresponde a una vegetación totalmente sana y cubre un mayor porcentaje dentro de la zona de estudio, esto puede deberse a que para este mes se presentan las mayores precipitaciones de año. Al contrario de marzo el mes con menores precipitaciones, el valor más alto del NDVI es de 0.85 y un valor mínimo que llega a -1, es decir una ausencia de vegetación o vegetación muerta.

En la figura 22 se muestra el comportamiento del histograma de NDVI para ambos meses, y se aprecia el comportamiento del ND respecto a la cantidad de píxeles. Para marzo el pico más alto se concentra entre 0.5 y 0.6 aproximadamente, en septiembre el histograma muestra la ascendencia desde 0.6 hasta el pico más alto en 0.8 aproximadamente.

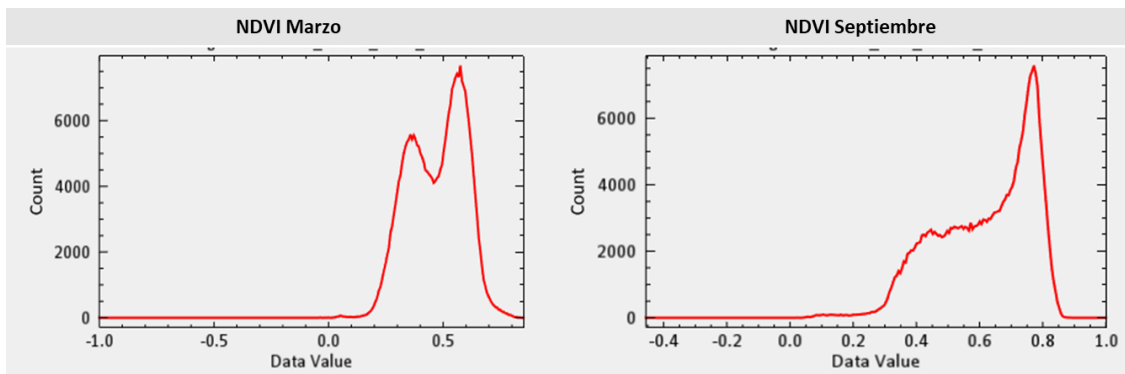


Figura 20. Histograma NDVI (marzo y septiembre).

A partir de los valores del ND es posible realizar una clasificación por abundancia de vegetación. De esta manera es posible tener y relacionar en el tipo de vegetación que se encuentra en la zona (figura 23). La escala de abundancia de vegetación va desde muy baja a alta.

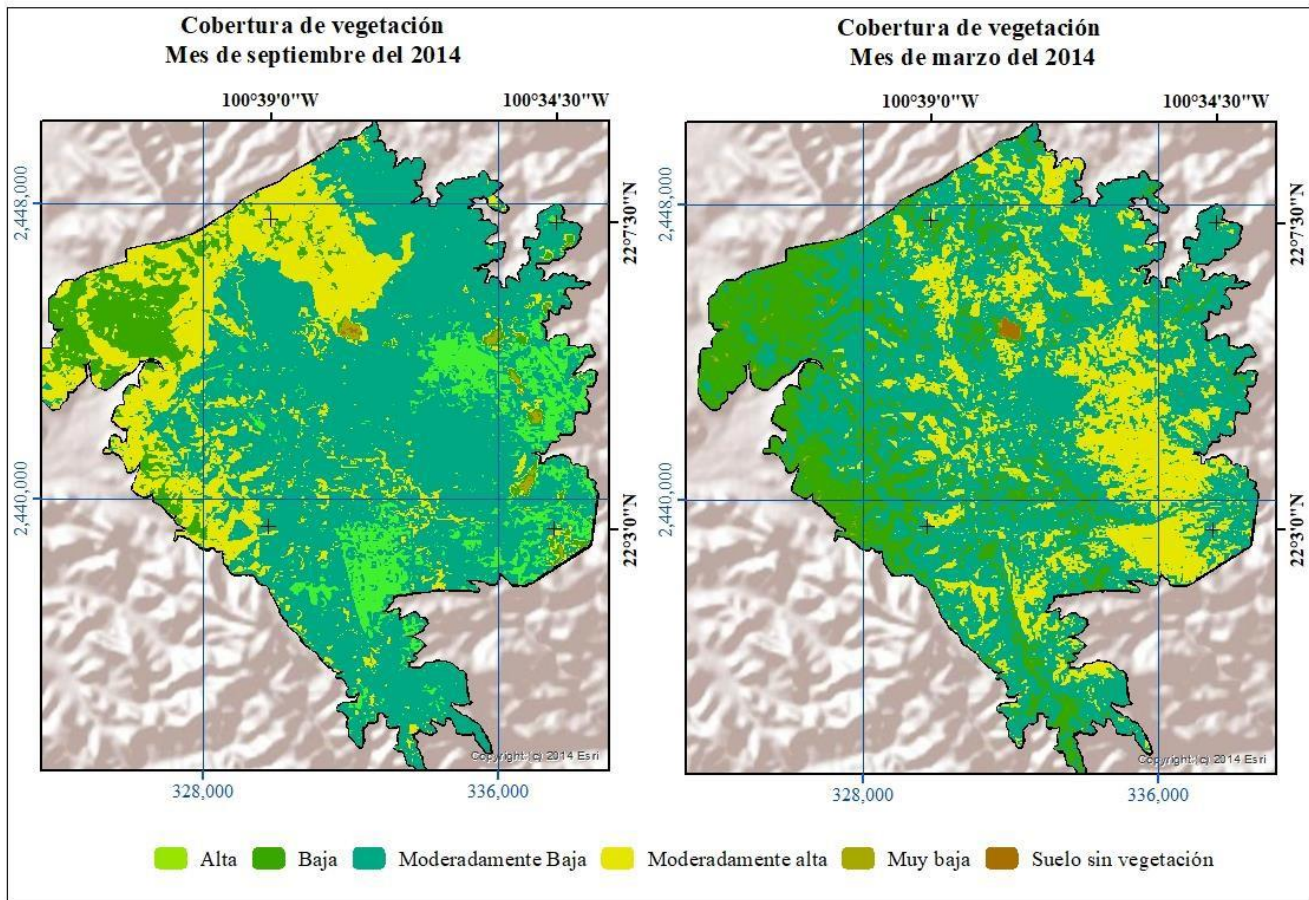


Figura 21. Mapa Cobertura vegetal de ANP (marzo y septiembre).

Como se menciona anteriormente, gracias a las abundantes precipitaciones que se presentan en septiembre, el mapa de cobertura vegetal muestra mayor porcentaje de vegetación en la zona para este periodo. En la figura 24, en la clasificación "Moderadamente alta", septiembre muestra el porcentaje más alto con un 61.7% del área con una diferencia de 39% respecto a marzo. La clasificación "Moderadamente baja" corresponde al mayor porcentaje de área en marzo, con una diferencia del 37.1% respecto a septiembre. Las clasificaciones "Muy baja" y "Suelo sin vegetación" abarcan los menores porcentajes para

ambos meses, puesto que es una zona de conservación en donde predomina las zonas boscosas.

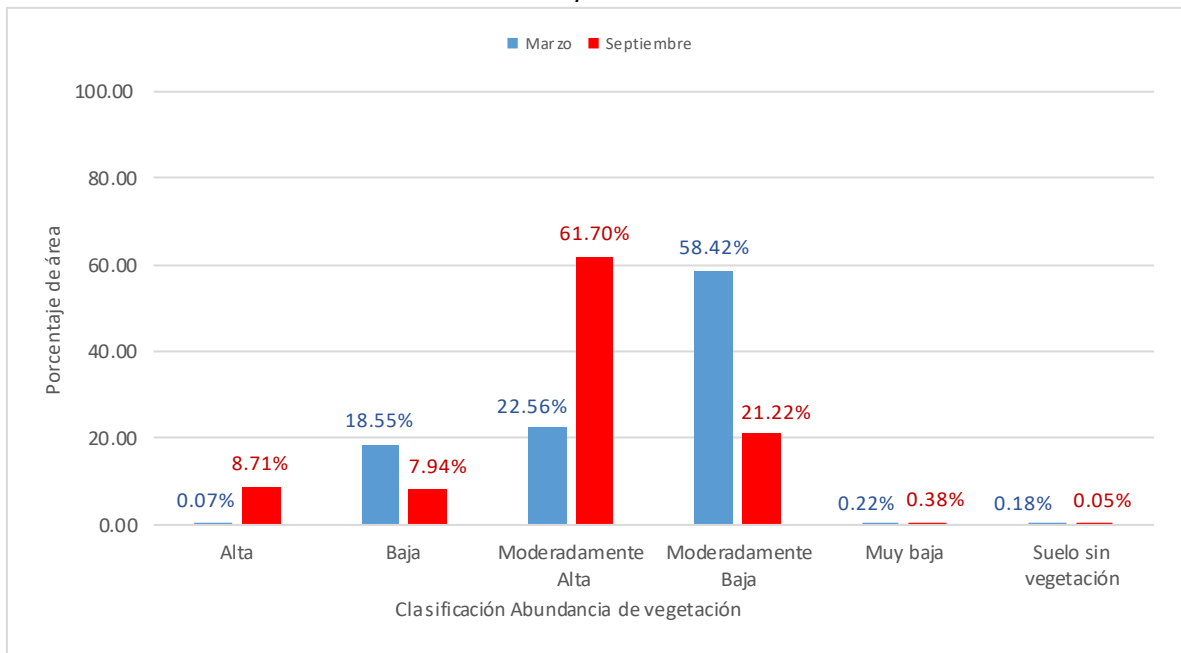


Figura 22. Clasificación de abundancia de vegetación en el ANP.

3.2.3. Modelación de Biomasa en el ANP Sierra de Álvarez

Se modeló la cantidad de biomasa aplicando las técnicas de interpolación y álgebra de mapas, para de esta manera escoger la mejor estimación y representaciones espacial que predijeran el cálculo de biomasa aérea y C completando los lugares que no cuentan con información de campo.

3.2.3.1. Modelación por álgebra de mapas

Para realizar la predicción de biomasa aérea, se usó como referente la imagen ráster de NDVI, ya que esta relaciona la abundancia de vegetación en la totalidad del área, por lo que los ND obtenidos en esta imagen fueron correlacionados con la cantidad de biomasa aérea que resultó del cálculo con los modelos alométricos. Para realizar esta correlación estadística se extrajeron los puntos de la capa que correspondían a los conglomerados del INFyS del ANP respecto

a la capa ráster con los ND del NDVI en ArcGIS. Esto se realizó tanto para el NDVI de marzo como para septiembre.

Estos valores fueron dispuestos en tablas de cálculos y se realizó el promedio de los ND del NDVI y la sumatoria de biomasa aérea por conglomerado, la que posteriormente fue extrapolada a kg/ha, con estos datos se observó la correlación que existían entre ellos a través de Pearson. El resultado de la correlación entre los ND de marzo y la cantidad de biomasa aérea fue de 0.52 y para septiembre de 0.72 lo que significa una diferencia significativa entre ambos meses, aunque el valor de la correlación para marzo no es muy fuerte, para septiembre si se acentúa más, por lo que se grafican para determinar el R² entre las variables en diferentes modelos de regresión (tabla 8).

Tabla 8. Modelos de regresión.

Modelo	R ²	
	Marzo	Septiembre
Exponencial	0.509	0.617
Lineal	0.233	0.518
Logarítmica	0.265	0.497
Potencial	0.610	0.63
Polinómica	0.298	0.555

Para ambos meses el mejor modelo de predicción fue el modelo de regresión potencial.

Fórmulas de los modelos seleccionados

- Marzo: $B = 1239503.06 * (NDVI)^{5.98}$
- Septiembre: $B = 352356 (NDVI)^{6.1906}$

A través de la herramienta “Raster calculator”, en el software ArcGIS, se corrieron los modelos en la capa del NDVI, siendo esta la variable independiente,

para cada mes, lo cual resultó una nueva capa con los valores estimados de biomasa aérea en toda el área que corresponde al ANP Sierra de Álvarez (figura 25).

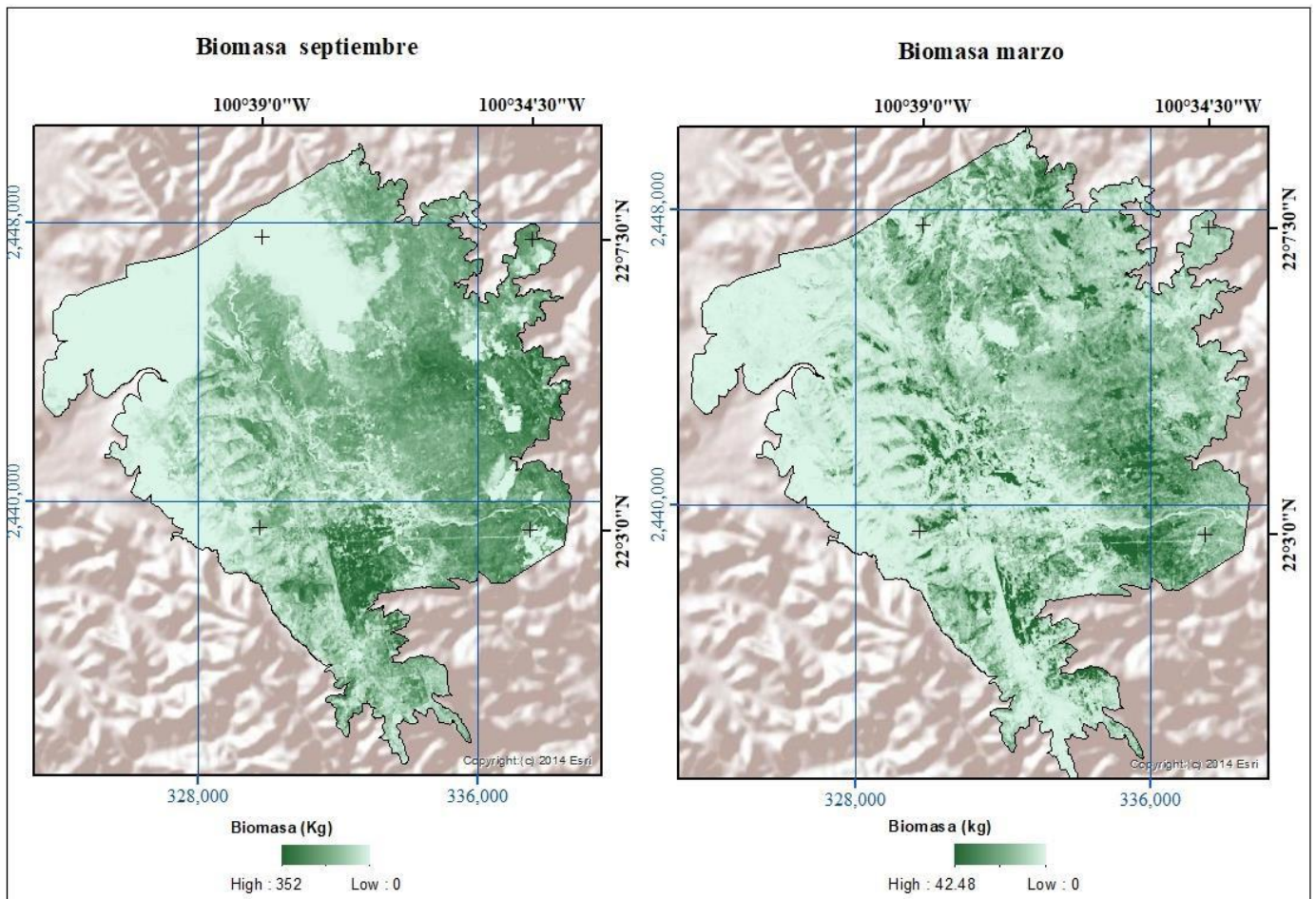


Figura 23. Mapa Estimación de biomasa aérea por álgebra de mapas.

La cantidad de biomasa observada para septiembre aumenta considerablemente respecto a marzo, pues los valores más altos en septiembre son de 352 Mg/ha. Y para marzo un valor de 42 Mg/ha, estos se representan con las tonalidades de verde más fuertes dentro del mapa.

Los valores máximos alcanzados en la estimación superan los promedios de biomasa para la clasificación de bosque mesófilo en México, ya que según el informe del INFyS del 2014 este tipo de vegetación logra ganar un estimado de 75 Mg/ha.

3.2.3.2. Modelación por interpolación

Para realizar la modelación de biomasa a través del método de interpolación, se usaron las extrapolaciones de sumatorias de biomasa por conglomerado y se interpolaron a través de los métodos Kriging simple, ordinario y universal y cokriging, usando para este último como covariable los números digitales del NDVI previamente obtenidos.

Realizando la comparación de medias de los resultados de los distintos métodos de interpolación, se obtuvo con mejores resultados en el método de kriging simple (figura 26) dando como resultado de hasta 41.6 Mg/ha sin embargo, la información espacial debido a la cantidad reducida de conglomerados en el ANP Sierra de Álvarez a través de la interpolación se observa muy generalizada, por lo que se decide continuar el análisis con la metodología de álgebra de mapas.

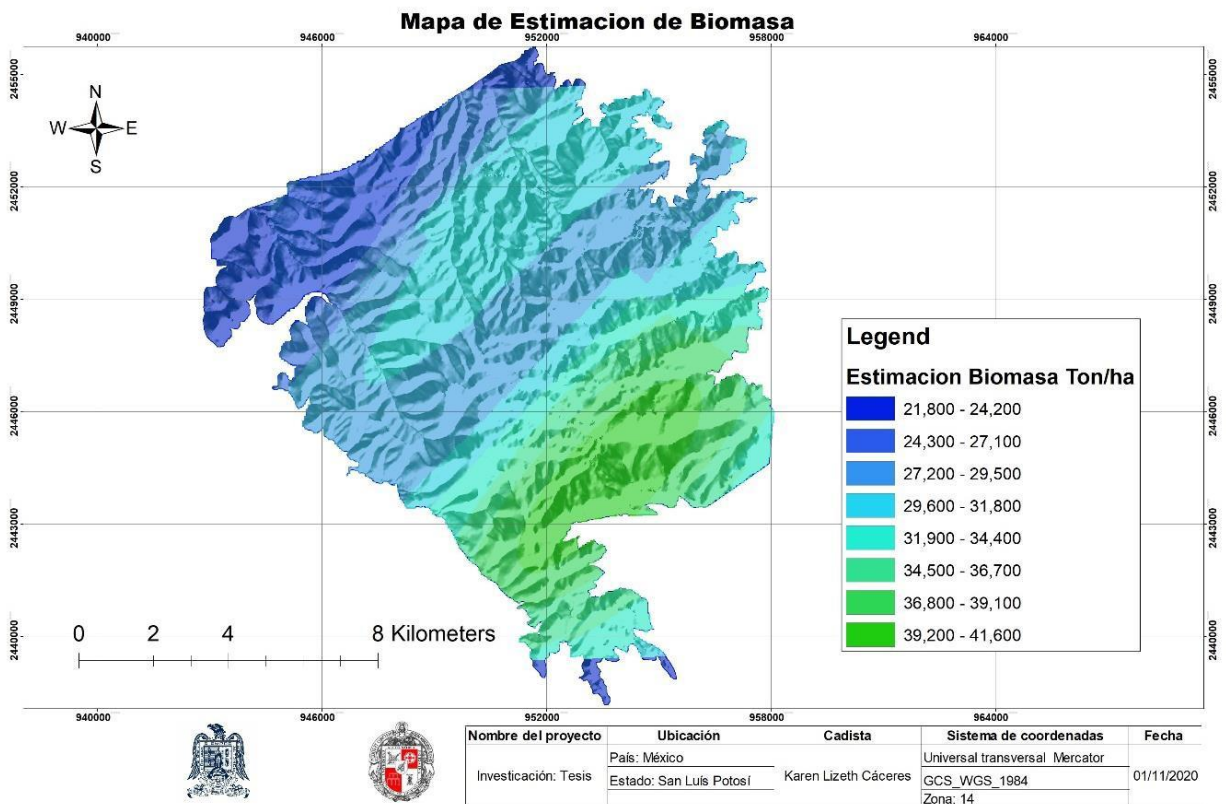


Figura 24. Mapa Interpolación Kriging simple de Biomasa aérea.

4. CORRELACIÓN ESTADÍSTICA ENTRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA Y CARBONO EN EL ÁREA NATURAL PROTEGIDA SIERRA DE ÁLVAREZ

4.1. Recopilación teórica de la correlación

Dentro de los estudios de C, como ciclo biogeoquímico, muy poco se tiene en cuenta los causas superficiales de agua dulce. Según (Cole *et al.*, 2007), las representaciones simplificadas del ciclo global del C han consistido generalmente en dos secciones biológicamente activas (océanos y tierra) conectadas a través de intercambios de gas con una tercera sección, la atmósfera.

Diferentes estudios demuestran que los ríos suministran cantidades significativas de C orgánico e inorgánico de origen terrestre desde la tierra al mar (Degens *et al.*, 1991) y funciona como un conector fluvial transporta C desde la tierra hasta el océano. El carbono ingresa a la parte biológica del sistema a través de la asimilación fotosintética del CO₂ atmosférico, este carbono asimilado apoya la respiración de todos los organismos (plantas, microbios y animales), más algo de oxidación abiótica a CO₂ en el fuego y fotooxidación (Bertilsson *et al.*, 1999; Randerson *et al.*, 2002). La producción neta del ecosistema tiene solo dos destinos posibles: almacenamiento dentro del sistema (como mayor biomasa viva más muerta o almacenamiento abiótico adicional) y exportación esto debido a que los ecosistemas terrestres tienen una gran capacidad para secuestrar CO₂ atmosférico cuando crecen (Cole *et al.*, 2007).

La biomasa está determinada por el equilibrio entre los insumos de biomasa (es decir, el crecimiento) y los productos (mortalidad). Por lo tanto, se puede esperar que las condiciones que favorezcan altas tasas de crecimiento, como el abundante suministro de agua, el calor y los suelos ricos en nutrientes, tenderán a correlacionarse con altos niveles de biomasa.

La disponibilidad de agua tiene un papel importante en la configuración de los patrones espaciales de las existencias de C a través de un enorme gradiente climático, de manera consistente con los déficits de agua que aumentan la mortalidad de los árboles y la distribución de tamaños de los rodales cambia para favorecer los árboles pequeños. La biomasa aérea no varió sistemáticamente con la temperatura, lo que sugiere que los procesos mediados por la temperatura, como la respiración autótrofa, no tienen un impacto importante en la biomasa forestal (Álvarez-Dávila *et al.*, 2017).

4.1.1. Correlación estadística

La correlación es una medida estadística para determinar la relación entre las variables, la dependencia determinada mediante la regresión lineal. Es una herramienta común para describir relaciones simples sin hacer afirmaciones sobre causa y efecto (Pita., 2001). Entonces la correlación es una medida normalizada de asociación o covariación lineal entre dos variables. Esta medida o índice de correlación puede variar entre -1 y +1, ambos extremos indicando correlaciones perfectas, negativa y positiva respectivamente. Un valor de correlación = 0 indica que no existe relación lineal entre las dos variables, es decir que entre más se acerque a 1 las variables aumentan su correlación. Una correlación positiva indica que ambas variables varían en el mismo sentido. Una correlación negativa significa que ambas variables varían en sentidos opuestos. Lo interesante del índice de correlación es que r es en sí mismo una medida del tamaño del efecto (Murrell, 2009).

La correlación se define en términos de la varianza (s^2) de las variables x e y y la covarianza ($cov(x, y)$). La varianza de una muestra representa el promedio de la desviación de los datos con respecto a la media.

$$\text{Varianza } (s^2) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N} = \frac{\sum x_i^2 - N\bar{x}^2}{N} \quad \text{Ecuación 5}$$

La covarianza entre dos variables (x, y) es una medida de la relación “promedio” éstas. Es la desviación promedio del producto cruzado entre ellas:

$$\text{Cov}(x, y) = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N} \quad \text{Ecuación 6}$$

4.1.2. Coeficiente de correlación Pearson

El coeficiente de relación de Pearson tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta, es decir mide el grado de covarianza entre las diferentes variables estudiadas (Restrepo *et al.*, 2007)

Para resolver el problema de dependencia de la escala o unidades de las mediciones es necesario una unidad a la cual pueda convertirse cualquier medida. Esta unidad de medida libre de escala es la desviación estándar (s ó σ). Al igual que la varianza, mide la desviación promedio de los datos con respecto a la media aritmética por no ser otra cosa que la varianza $\sqrt{\quad}$ $\sqrt{\quad}$

Al dividir cualquier distancia de la media por la desviación estándar, obtendremos una distancia en unidades de desviación estándar (Restrepo *et al.*, 2007). Por tanto, para normalizar la covarianza se debe dividir por la desviación estándar. Como la covarianza se calcula para dos variables $\text{cov}(x, y)$, tenemos que calcular la desviación estándar para cada variable, multiplicándolas entre ellas, es decir:

$$\text{Coef de correlac de Pear o r} = \frac{\text{cov } x y}{\sqrt{x y}} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{N \sqrt{x y}} \quad \text{Ecuación 7}$$

4.2. Aplicación del método de interpolación para la correlacionar agua y carbono

Como primer paso se analizaron gráficos de líneas e histogramas para explorar las propiedades y características de los datos de biomasa y balance hídrico obtenidos previamente, esto con el fin de observar la correlación entre ambas variables estudiadas. La exploración de datos es importante de prácticamente cualquier flujo de trabajo analítico.

Los resultados de biomasa los cuales se calcularon a través del método algebra de mapas, fueron dispuestos en un mapa traslapándose con la capa de disponibilidad de agua, que resultó de la interpolación del balance hídrico en los puntos de las estaciones meteorológicas de la zona de estudio, de esta manera es posible visualizar el comportamiento de la biomasa respecto a las cantidades de agua superficial captadas en el ANP Sierra de Álvarez.

4.3. Resultados de correlación

Para observar un patrón de comportamiento de la biomasa aérea y de la disponibilidad de agua dada por el balance hídrico, los resultados de la sumatoria por conglomerado y la disponibilidad de agua, fueron dispuestos en una gráfica (figura 27) la cual muestra la relación en las mediciones para las épocas estudiadas (seca y húmeda).

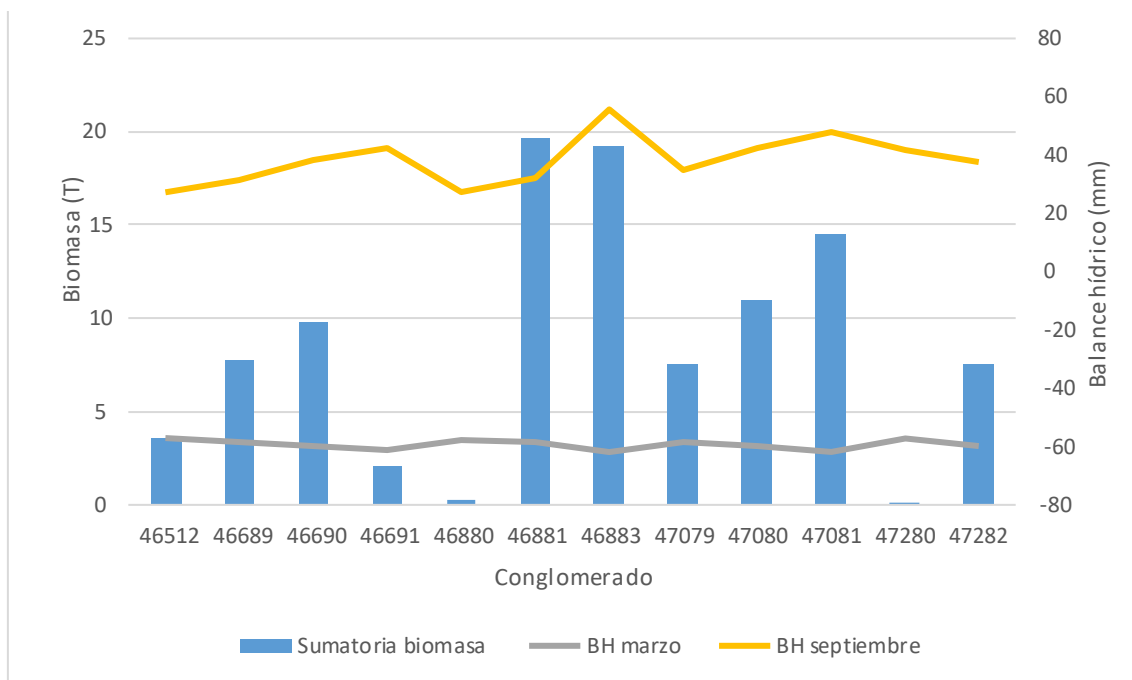


Figura 25. Gráfica relación de biomasa vs balance hídrico.

Como se observa en la gráfica, septiembre que es el mes húmedo tiene una mayor relación el balance hídrico puesto que los picos de balance hídrico se acentúan conforme a los picos de la sumatoria de la cantidad de biomasa por conglomerado ya que en este periodo es donde existe un cambio drástico en la vegetación aumentando la biomasa. Se comprueba además con una correlación a través del coeficiente de Pearson en el cual se obtuvo un resultado significativo de un 0.7. Además de una línea de tendencia (figura 28), en la cual se puede observar una correlación considerable con un R^2 de 0.6108 con un ajuste polinomial (tabla 9).

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0.074171471
Coeficiente de determinación R^2	0.005501407
R^2 ajustado	-0.243123241
Error típico	1.576129381
Observaciones	6

Tabla 9. Análisis estadístico.

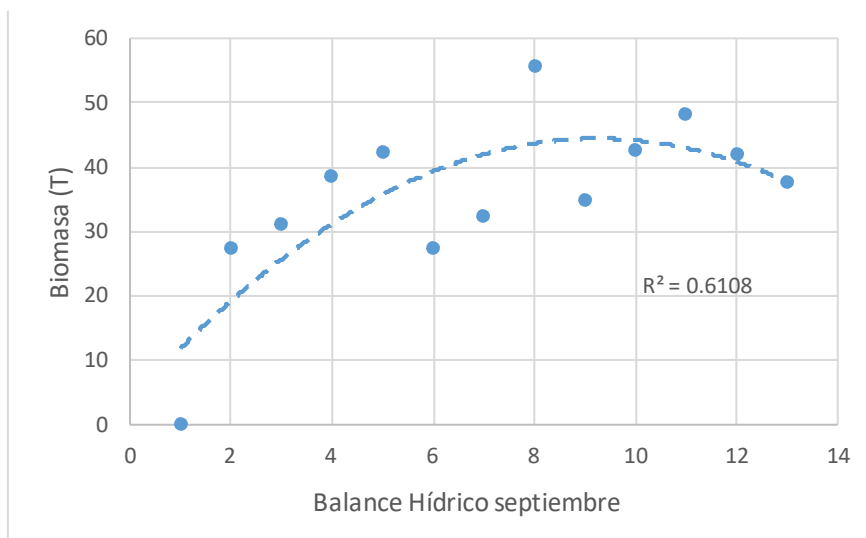


Figura 26. Línea de tendencia (correlación biomasa vs balance hídrico (septiembre)).

Caso contrario sucede en la temporada seca, que corresponde al mes de marzo, en donde la relación es casi nula, pues el balance hídrico presenta espacialmente un comportamiento constante, es decir que no depende de la cantidad de biomasa o cubrimiento forestal, esto puede deberse a que existen reservas de agua en la vegetación causa de la fenología de la vegetación. De igual manera es posible observar en la (figura 29) un $R^2 = 0.2622$ demostrando su baja correlación entre ambas variables.

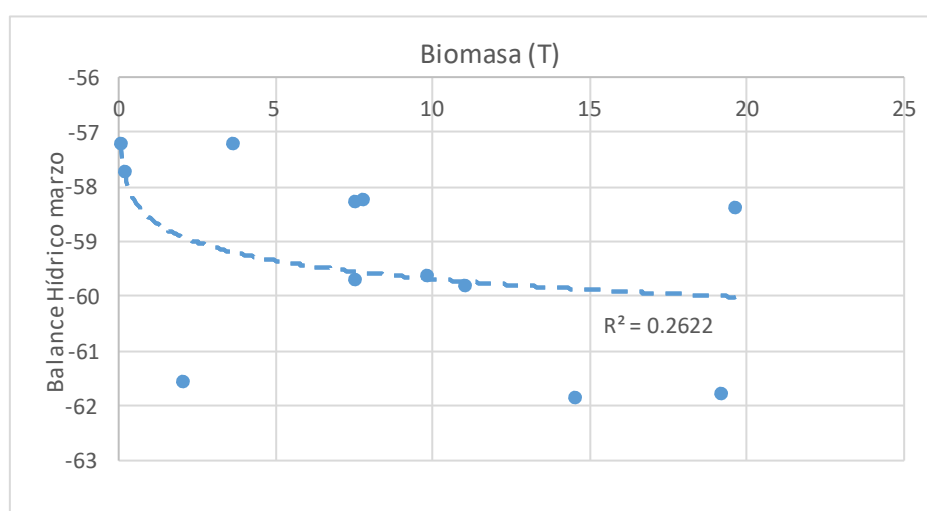


Figura 27. Línea de tendencia (correlación biomasa vs balance hídrico (marzo)).

4.4. Correlación

Una vez fueron traslapados los resultados tanto de disponibilidad de agua como de biomasa (figura 30), se logra observar de manera espacial la relación que existen entre los dos recursos ecosistémicos calculados para el periodo seco y húmedo, la capa que corresponde a la cantidad de biomasa estimada dentro del ANP Sierra de Álvarez se encuentra en una escala de grises en la tonalidad que tiende a negro, refleja los mayores valores de biomasa en Mg/ha y la capa que refleja los valores de balance hídrico en mm/ha y se representa en tonalidades de azul a amarillo, siendo el color azul los valores más altos en agua disponible.

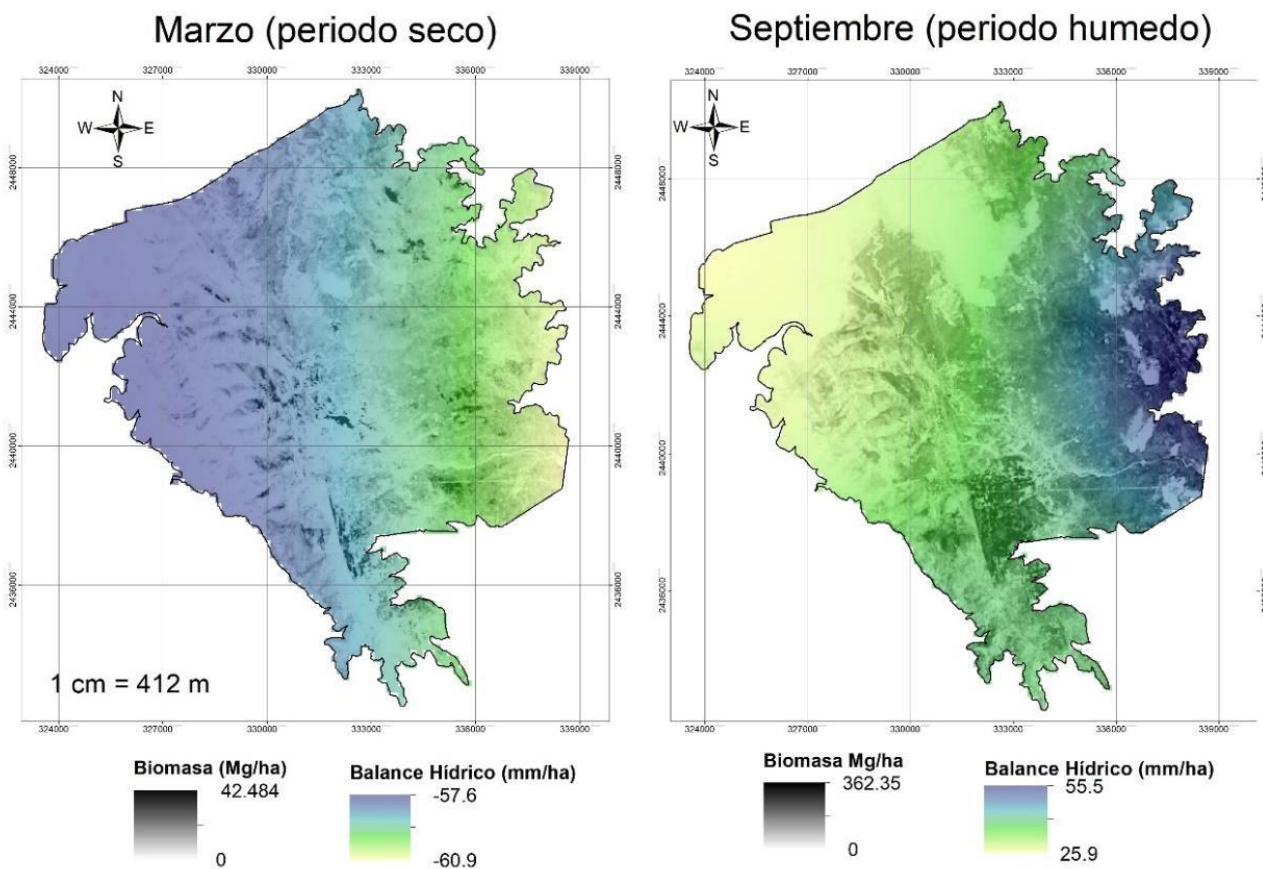


Figura 30. Mapa de correlación entre el balance hídrico y la biomasa del ANP Sierra de Álvarez.

Para el periodo seco se observa que las zonas en las cuales hay una cantidad de biomasa considerable respecto a toda el área, son fracciones muy pequeñas distribuidas en distintos puntos del ANP, aunque hay una parte homogénea de vegetación del centro hacia el este, coincidiendo con el mayor déficit de disponibilidad de agua, alcanzando los -60 mm/ha de agua, ese resultado coincide con lo expuesto por la (FAO, 2005), en la cual afirma que al haber un aumento de vegetación existe una disminución de la disponibilidad de agua, ya que los árboles aumentan la evapotranspiración aumentando las pérdidas de agua.

Lo anterior también se debe a que la mayor parte de las especies arbóreas pertenecen a la clasificación de bosque encino y una peculiaridad de estos es el patrón en la duración de las hojas, y algunos son encinos perennifolios los cuales el follaje siempre se mantiene verde, y se va sustituyendo de manera paulatina. Pero también están los encinos caducifolios que pierden la totalidad de sus hojas durante la estación de sequía, por lo que en esta época hay una disminución significativa de la biomasa aérea.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para ambos procesos de estimación se puede inferir de manera proporcional que por cada Mega gramo (Mg) de Carbono (C) aéreo producido en la zona existe una pérdida de 0.4 milímetro (mm) de agua. Aunque cabe resaltar que no sería preciso afirmarlo ya que como se analizó anteriormente durante este periodo no hay una correlación significativa, por lo que esta estimación puede tener un margen de error amplio (tabla 10).

<i>Marzo</i>				
	Disponibilidad agua (mm)	Biomasa (Mg)	Carbono (Mg)	Carbono (Mg) / Agua (mm)
Valor superior	-58	42.5	21.25	-0.4
Valor inferior	-81	0	0	

Tabla 10. Correlación de valores estimados (agua y carbono), marzo.

Para el periodo húmedo se puede observar ganancias de agua, aunque no muy significativa de hasta 55 mm/ha al contrario de del periodo seco. Esta ganancia se concentra en donde se ubica la mayor abundancia de vegetación, y las perdidas en suelos descubiertos de vegetación, lo cual sucede ya que en esta época existen altas en las temperaturas y la vegetación disminuye considerablemente los efectos de esta.

Para este periodo el cual, si tuvo una correlación espacial estrecha, es posible afirmar que por cada Mg de C aéreo se retiene 3.3 mm de agua superficial como lo indica la tabla 11.

<i>Septiembre</i>				
	Disponibilidad agua (mm)	Biomasa (Mg)	Carbono (Mg)	Carbono (Mg) / Agua (mm)
Valor superior	55.5	362.3	181.15	3.3
Valor inferior	25.9	0	0	

Tabla 5. Correlación de valores estimados (agua y carbono), septiembre.

CONCLUSIONES

La metodología propuesta en este trabajo cumple y resuelve con la problemática identificada en este trabajo, puesto que es posible correlacionar los dos recursos naturales más relevantes para la conservación, como lo fueron agua y carbono, logrando describir las cantidades estimadas en la zona, esto a través de dos métodos ampliamente usados en la estimación de agua por medio del balance hídrico y el segundo, la cantidad de biomasa y con esto de C mediante ecuaciones alométricas apoyadas por el NDVI. La unificación de esos dos métodos mediante una descripción espacial corresponde a la aportación técnica y científica, además de que los resultados describan el valor ambiental del ANP Sierra de Álvarez, quedando esto como registro para posteriores estudios o considerado para el manejo adecuado de la zona.

El balance hídrico bajo el método de Thornthwaite, describe de manera precisa el comportamiento del agua superficial, logrando estimar las cantidades de agua disponible en la zona. Debido a que existen cambios bruscos en la temperatura y las precipitaciones durante el año, aumentan las pérdidas de agua en el sistema mediante la evapotranspiración potencial, por lo que se identificaron grandes pérdidas de agua en el ANP, llegando a un déficit de -81 mm/ha de agua superficial en marzo. Como lo menciona por Santillán, quien indica que la baja generación de escurrimiento posiblemente se deba a cambios en la precipitación (escasa lluvia o entrada de agua), y los de la temperatura y la evapotranspiración (aumento en los valores) que provoca una disminución de la humedad del suelo.

Para septiembre, el periodo con mayor precipitación se estimó hasta 50 mm/ha de agua disponible, poco menos de la mitad de la precipitación media, agua que probablemente alimente los cauces superficiales en las partes bajas, y/o sirva como reserva para los periodos más secos.

Los resultados encontrados en la estimación de disponibilidad de agua a través del balance hídrico coinciden con las características generales del estado de San Luís, mencionadas en el balance hídrico integral realizada por el INEGI

En el cual, también considerando condiciones medias de precipitación pluvial, se afirma que en promedio del 100% de las precipitaciones que entran al sistema hídrico, más del 84% se pierde a través de la evapotranspiración, quedando un 16% de agua disponible, de esta una parte se infiltra y el otro escurre a los cuerpos de agua.

El ANP Sierra de Álvarez junto con la sierra de San Miguelito limita al Valle de San Luis Potosí, es por esta razón que estas áreas son la principal fuente de recarga hídrica, la cual ocurre por infiltración vertical, por retornos de riego y por aporte lateral, estimándose en 74 mm³ anuales.

A partir de los datos del inventario forestal nacional y de suelo es posible estimar valores de biomasa aérea bajo el método de ecuaciones alométricas. Puesto que esta base de datos cuenta con la información necesaria para las fórmulas alométricas, es importante la combinación de este método con las técnicas de interpolación ya que existen vacíos espaciales en los valores muestreados, debido a distintos factores como el difícil acceso a causa de la topografía. De esta manera se disminuye considerablemente el margen de error que pudiera haber durante el proceso de estimación de biomasa aérea. Para el caso se obtuvieron valores hasta 181.15 Mg/ha de C aéreo, superando los valores promedios para el tipo de vegetación identificado en el ANP el cual corresponde en su gran mayoría a bosque mesófilo; los valores más bajos se observan en temporadas de baja precipitación obteniendo un estimado de hasta 21.25 Mg/ha de C aéreo.

Se encontró una relación estrecha entre el aumento de vegetación y la disponibilidad de agua verificado con R² mayor a 6, óptimo en este tipo de variables. Por lo que se concluyó a través de los resultados que por cada Mg de C aéreo se retiene 3.3 mm de agua superficial.

Para marzo no existe una correlación fuerte entre las cantidades de carbono y la disponibilidad de agua, por lo que no es posible afirmar la pérdida o aportación

de agua superficial por una cantidad específica de carbono, esto puede ser debido a las características fenológicas de la vegetación en adaptación a la sequía que se presenta en este periodo.

Dichas cantidades solo tuvieron correlación con la biomasa para el periodo húmedo, puesto que las precipitaciones y las características ecosistémicas de la zona logran un aumento de biomasa de forma exponencial respecto al aumento de agua superficial., Existen cambios bruscos en la temperatura y las precipitaciones que logran aumentar las pérdidas de agua en el sistema mediante la evapotranspiración potencial por lo que se identificaron grandes pérdidas de agua en el ANP, llegando a un déficit de -81 mm/ha de agua superficial en el periodo seco.

Para el periodo con mayor precipitación puede haber hasta 50 mm/ha de agua disponible, poco menos de la mitad de la precipitación media, agua que probablemente alimente los cauces superficiales en las partes bajas, y/o sirva como reserva para los periodos más secos.

Este tipo de ecosistema mantiene un patrón con las precipitaciones, aunque es resistente biológicamente a las sequías, es afectado por la escasez de precipitación y las altas temperaturas, el cual propician la pérdida de agua por evapotranspiración.

Son escasos los estudios que relacionen el comportamiento hídrico de la zona con la vegetación, aunado a la falta de información recabada del ANP sierra de Álvarez hacen de este estudio un aporte información base importante, entorno al comportamiento del agua y la biomasa, además de mostrar un estimado en los SAB, aprovechables en la zona.

Recomendaciones

Para comprender y estimar mejor la cantidad de agua disponible se recomienda hacer un estudio en el cual se tengan en cuenta la cuenca y la dinámica de agua subterránea, ya que las especies mesófilas y de pino exploran zonas de almacenamiento de humedad profundas en suelo y fracturas de las rocas para facilitar el ascenso del agua y depositarla cerca de la superficie del suelo. De esta manera la relación entre el agua y la vegetación se comprende en un mismo sistema de forma más precisa.

El mejor método de modelación de biomasa para este caso de estudio y similares, es el método de álgebra de mapas, puesto que este permite realizar cálculos por pixel cubriendo todas las zonas de la imagen de forma homogénea, evitando las sub o sobrestimaciones.

En el caso de que los puntos de muestreo de datos alométricos sean escasos, no es conveniente utilizar los métodos de interpolación geoestadísticos estocásticos, ya que al no tener información suficiente la información se generaliza obteniendo valores poco confiables.

Se necesita hacer un estudio más profundo, con datos tomados en el área para mejorar la calidad de los resultados disminuyendo el sesgo puesto que se utilizó información oficial la cual es poca y muy generalizada.

REFERENCIAS

- Álvarez Dávila, E. A., Cayuela, L., González-Caro, S., Aldana, A. M., Stevenson, P. R., Phillips, O., Cogollo, A., Peñuela, M. C., von Hildebrand, P., Jiménez E., Melo, O., Londoño-Vega, A. C., Mendoza, I., Velásquez, O., Fernández F., Serna, M., Velázquez-Rúa, C., Benítez, D., & Rey-Benayas, J. M. (2017). *Forest biomass density across large climate gradients in northern South America is related to water availability but not with temperature*. PLoS ONE 12(3): e0171072. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171072>
- AMBIO. (2018). *Bonos de carbono*. <http://ambio.org.mx/bonos-de-carbono/>
- Ancira-Sánchez, L., & Javier Treviño Garza, E. (2015). Using satellite images for forest management in northeast Mexico. *Madera y Bosques*, Vol. 21(1), 77–91.
- Arancibia, M. E. (2008). El uso de los sistemas de información geográfica -SIG- en la planificación estratégica de los recursos energéticos. *Polis (Santiago)*, 7(20). 227-238. <https://doi.org/10.4067/s0718-65682008000100012>
- Bertilsson, S., Stepanauskas, R., Cuadros-Hansson, R., Granéli, W., Wikner, J., & Tranvik, L. (1999). Photochemically induced changes in bioavailable carbon and nitrogen pools in a boreal watershed. *Aquatic Microbial Ecology*, 19(1), 47–56. <https://doi.org/10.3354/ame019047>
- Breña Puyol, A. F., & Jacobo Villla, M. A. (2006). Principios y fundamentos de la hidrología superficial. *Universidad Autónoma Metropolitana*, 288 págs.
- Brondizio, E. S., Moran, E. F., Mausel, P., Wu, Y., & Program, P. D. (1994). Land Use Change in the Amazon Estuary: Patterns of Caboclo Settlement and Landscape Management. *Human Ecology*, 22(3).
- Brown, S. (1997). *Previous estimates of forest biomass*. <https://www.fao.org/3/w4095e/w4095e00.htm>
- Bunge, V. (2010). *La disponibilidad natural de agua en las cuencas de México*. 46–49.
- Castillo, M. I. (1997). *SAN LUIS POTOSÍ: trazos de su territorio*. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/estados/libros/sanluis/html/sanlu.html>

- Castillo L., P., Flores C., J. A., Aguirre R., J. R., & Yeaton H., I. Y. (2008). Dinámica sucesional del encinar de la sierra de Álvarez, San Luis Potosí, México. *Madera y Bosques*, 14(1), 21–35.
- Ceroni, M., Achkar, M., Inés, G., & Burgueño, J. (2015). Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay. *Revista de Teledetección*, 31. <https://doi.org/10.4995/raet.2015.3683>
- Chrysanthis, P. K., Raghuram, S., & Ramamritham, K. (1991). Extracting concurrency from objects: A methodology. *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 61702, 108–117. <https://doi.org/10.1145/115790.115803>
- Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de teledetección espacial. Segunda edición. Ediciones Rialp, S. A. 454 p.
- CMICEF. (2012). *Ecuaciones Alométricas (México)*. <http://www.monitoreoforestal.gob.mx/bases-de-datos/>
- Cole, J. J., Prairie, Y. T., Caraco, N. F., Mcdowell, W. H., Tranvik, L. J., Striegl, R. G., Duarte, C. M., Kortelainen, P., Downing, J. A., Middelburg, J. J., & Melack, J. (2007). Plumbing the Global Carbon Cycle: Integrating Inland Waters into the Terrestrial Carbon Budget. *Ecosistemas*, 5. <https://doi.org/10.1007/s10021-006-9013-8>
- CONABIO. (1989). Tierra de. *America*, 110, 453–455.
- CONAFOR. (n/d). *Marco de Planificación para los Pueblos Indígenas (MPPI) Proyecto “ Conservación de Cuencas Costeras en Respuesta al Cambio Climático ”*.
- CONAFOR. (2014). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos - San Luis Potosí*.
- CONANP. (2018). *Anexo 2 Programa De Manejo De Áreas Naturales Protegidas (Promanp) 2018 Conceptos De Apoyo Términos De Referencia*. 1–229.
- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. J. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00089-7)
- Degens, E., Kempe, S., & Richey, J. (1991). Summary: Biogeochemistry of major world rivers (SCOPE 42). En *SCOPE* (Vol. 42, pp. 323–347).
- Duque-Sarango, P., Cajamarca-Rivadeneira, R., Wemple, B. C., & Delgado-

- Fernández, M. E. (2019). Estimación del balance hídrico de una cuenca andina. *La Granja*. 56-69. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.05>
- Chuvienco, E. (1995). *FUNDAMENTOS DE LA TELEDETECCIÓN* (Segunda). <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist. Cart. y Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
- Escobar Carmona, R. (2016). *Estimación de la Biomasa Forestal de la Sierra San Miguelito por Medio de Imágenes de Satélite*. 68.
- Espinoza, N., Gatica, J., & Smyle, J. (1999). *El pago de servicios ambientales y el desarrollo sostenible en el medio rural*. Serie de Publicaciones RUTA. 88p.
- Fallas, J. (2007). Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones. *ResearchGate, July*, 1–79.
- FAO. (1990). *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.pdf>
- FAO. (2005). *Los bosques y el agua*.
- FAO. (2016). *Previous estimates of forest biomass*. <http://www.fao.org/3/w4095e/w4095e04.htm>
- FAO. (2018). *PROBIOMASA - Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa*. <http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/biomasa.php>
- Fregoso, A. (2006). La oferta y el pago de los servicios ambientales hídricos: una comparación de diversos estudios. *Gaceta Ecológica*, 78, 29–46.
- Galeana-Pizaña, J. M., Ordóñez-Díaz, J. A. B., & Corona-Romero, N. (2013). Estimación de contenido de carbono en la cuenca del río Magdalena, México. *Madera Bosques*, 19(1), 53–69. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.191347>
- Gayón, J. (2000). History of the Concept of Allometry. *American Zoologist*, 40(5), 748–758. <https://doi.org/10.1093/icb/40.5.748>
- Gebreyohannes, T., De Smedt, F., Walraevens, K., Gebresilassie, S., Hussien, A., Hagos, M., Amare, K., Deckers, J., & Gebrehiwot, K. (2013). Application of a spatially distributed water balance model for assessing surface water and groundwater resources in the Geba basin, Tigray, Ethiopia. *Journal of Hydrology*, 499, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.06.026>

- Huerta, G., & Jiménez, F. (2010). Una guía de diagnóstico rápido para determinar el potencial de pago por servicios ecosistémicos hídricos en microcuencas hidrográficas. *Revista de Ciencias Ambientales*, 40, 34-43. <https://doi.org/10.15359/rca.40-2.4>
- Hurtado, C. C., Corte, C., & Triana, M. A. (2017). Estimación del carbono almacenado en el bosque natural en la cuenca media - baja. Municipio de río quito chocó, colombia. *Ingeniería e Innovación*, 5(1), 32–42. <https://doi.org/10.21897/23460466.1102>
- IPCC, Houghton, J. T., Filho, L. G. M., Lim, B., Tréanton, K., Mamaty, I., Bonduki, Y., Griggs, D. J., & Callander, B. A. (1996). *Libro de trabajo para el inventario de gases de efecto invernadero* (Vol. 2).
- Jara, M. C. S. (2018). *Estimación de Biomasa Aérea y Carbono con Teledetección en Bosques Alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora "Iguaque"*. 59(3r). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16518.01608>
- Jaramillo, V. J.. (2007). *Ciclo global del carbono*. <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/jaramillo.html>
- Lara-Castillo, P., Cano-Flores, J., Aguirre Rivera, J., & Yeaton, I. (2008). Dinámica sucesional del encinar de la sierra de Álvarez, San Luis Potosí, México. *Madera y Bosques*, 14(1), 21–35.
- Lara, P. C. (2007). *Evolución reciente y estado actual de la vegetación del área natural protegida sierra de Álvarez, S. L. P.*
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Moran, E., Batistella, M., Zhang, M., Vaglio Laurin, G., & Saah, D. (2012). Aboveground Forest Biomass Estimation with Landsat and LiDAR Data and Uncertainty Analysis of the Estimates. *International Journal of Forestry Research*, 436537. <https://doi.org/10.1155/2012/436537>
- Manson, R. H. (2016). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–20. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011276>
- McDonald, A. (1979). Water in environmental planning, Thomas Dunne and Luna Leopold, W. H. Freeman & Co. San Francisco. Price: £17.40. *Earth Surface Processes*, 4(3), 305–306. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/esp.3290040322>

- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., Meyer, L. (2005). La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. En *Director*. 17(4). 57p.
- Morfín R., J. E., Michel F., J. M., González M., R., Carrillo, O., Mayorga, R., Rangel, L., Orozco O., J., Rodríguez A., G., & Guerrero P., G. (2015). Estimación de las reservas de carbono en la biomasa forestal en México. *Fortalecimiento de la preparación REDD+ en México y fomento de la cooperación Sur-Sur*. 135 p.
- Murcia, U. de. (2003). *Plataformas, sensores y canales*. Apuntes de La Asignatura Teledetección En Geografía. <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf%0Ahttp://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema03.pdf>
- Murrell, P. (2009). R Graphics. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 1(2), 216–220. <https://doi.org/10.1002/WICS.22>
- Ordoñez Díaz, J. B. (1999). *Captura de Carbono en un bosque templado*. (Número February).
- Ordoñez G., J. J. (2011). Balance Hídrico Superficial. Cartilla técnica. Sociedad Geográfica de Lima. Primera edición. 44p.
- Perea-Ardila, M. A., Andrade-Castañeda, H. J., & Segura-Madriral, M. A. (2018). Estimación de biomasa aérea y carbono con Teledetección en bosques alto-Andinos de Boyacá, Colombia. Estudio de caso: Santuario de Fauna y Flora Iguaque Aboveground biomass and carbon estimation in the high-Andean forests of Boyacá, Colombia using remote. *Mayo*. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.821>
- Pérez, E., & Carril, U. (2009). Fotosíntesis: Aspectos Básicos. *Reduca (Biología)*. *Serie Fisiología Vegetal*, 2(3), 1–47.
- Pita Fernández S., P. D. S. (2001). *Investigación: Relación entre variables cuantitativas 1/8*. 1–8.
- Randerson, J. T., Chapin, F. S., & Harden, W. (2002). Net Ecosystem Production : a Comprehensive Measure of Net Carbon Accumulation By Ecosystems. *Ecological Applications*, 12(4), 937–947.
- Restrepo, L. F., Julián González L, ;, Est, E., & Bioma, E. (2007). *De Pearson a Spearman From Pearson to Spearman*. 20, 183–192.
- Reyes C., O. (2017). *Modelación geoestadística de la variación espacial de la vegetación en San Luis Potosí*. Tesis de Doctorado. Universidad Autónoma

de Nuevo León.

- Robert, M. (2002). Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra. Informe sobre recursos mundiales de suelos No. 96. In *Fao*. Disponible en <https://www.fao.org/3/bl001s/bl001s.pdf>
- Shi, L., & Liu, S. (2017). Methods of Estimating Forest Biomass: A Review. In *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*. InTech. <https://doi.org/10.5772/65733>
- Smith, T. M., Cramer, W. P., Dixon, R. K., Leemans, R., Neilson, R. P., & Solomon, A. M. (1993). The global terrestrial carbon cycle. *Water, Air & Soil Pollution*, 70, 19-37. <https://doi.org/10.1007/BF01104986>
- Sousa, A. M. O., Gonçalves, A. C., & Marques da S., J. R. (2017). Above-Ground Biomass Estimation with High Spatial Resolution Satellite Images. In *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*. InTech. <https://doi.org/10.5772/65665>
- Speich, M. J. R. (2019). Quantifying and modeling water availability in temperate forests: A review of drought and aridity indices. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 12(1), 1–16. <https://doi.org/10.3832/ifor2934-011>
- Sánchez, F. G., Rivera, J. R. A., Díaz*, J. V., & Pérez, J. G. (1999). Contribución al conocimiento florístico de la Sierra de Álvarez, San Luis Potosí, México. *Polibotánica*, 10, 0.
- SEMARNAT. (2018, diciembre). *Distributing Allowances in the Mexican Emissions Trading System: Indicative Allocation Scenarios*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/505767/Distributing_Allowances_in_the_Mexican_ETS.pdf.
- SNIA. (2012). *Sistema nacional de informacion agropecuaria*. Obtenido de <http://www.snia.gub.uy/nosotros/que-es-el-snia>
- Toribio, G. (25 de 10 de 2019). *Teledeteccion*. Obtenido de <https://www.cursosteledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- Tuñón, J., Morell, I., & Ferriols, N. (1999). Observaciones prácticas sobre el cálculo del balance de agua en el suelo. ... *en la Zona no Saturada del Suelo*, 45–51. http://abe.ufl.edu/carpena/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v4/i-07.pdf
- Vaca, R. A., Duncan, Y., & Golicher, J. (2016). Integración del balance hídrico en

la modelación de la distribución de especies de árboles mexicanos. *Botanical Sciences*, 94(1), 25–42. <https://doi.org/10.17129/botsci.241>

Vargas Guillén, A., Aguilar Martínez, S., Santiago, M. A. C., Bazán, E. E., Antonio Hernández Vázquez, M., María López Gómez, A., Quechulpa, S., Corredor, M., Mesoamericano, B., Serie, M., & Número, A. /. (2009). *Programa Estatal para la Compensación por Servicios Ecosistémicos Una propuesta para Chiapas Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*. www.cbmm.gob.mx

Villón, M. (s/f). *Introducción*.

Yengoh, G. T., Dent, D., Olsson, L., Tengberg, A. E., & Tucker III, C. J. (2015). *Use of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Assess Land Degradation at Multiple Scales Current Status, Future Trends, and Practical Considerations*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24112-8>

Zhang, Y., Wang, X., Li, C., Cai, Y., Yang, Z., & Yi, Y. (2018). *NDVI dynamics under changing meteorological factors in a shallow lake in future metropolitan, semiarid area in North China OPEN*. 8, 15971. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33968-w>