



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

**Estimación del uso y aprovechamiento del agua en el
estado de San Luis Potosí a través de un modelo de
distribución espacial.**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestra

en Tecnología y Gestión del Agua

Presenta:

Ing. Karen Roxana Méndez Hernández

Asesor:

Dr. Abraham Cárdenas Tristán



San Luis Potosí, S. L. P.

Marzo 2017.

In Veritate.

Agradecimientos

La Universidad me ha abierto las puertas al conocimiento de un mundo maravilloso y me ha brindado oportunidades incomparables.

Agradezco mucho la ayuda de todos mis maestros, por ayudarme a vivir el sueño de superarme y acompañarme en el camino. A mi director de tesis, Dr. Abraham Cárdenas Tristán, por su amistad; por haberme inculcado un sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico para formarme como investigadora. Al Dr. Hilario Charcas, por haber compartido generosamente sus conocimientos, por su motivación y orientaciones. A la Dra. Selene Berber, por haberme brindado su apoyo en momentos clave de esta maestría. Al M.I. Luis Arturo González Ortiz, por convertirse en cómplice de este proyecto. Al M.I. Salvador Martínez Hernández, mi amigo y maestro. A la Dra. Cristina Noyola, por haber compartido con generosidad sus conocimientos y amistad.

A mis compañeros, mis amigos y mis alumnos, por el legado que cada uno de ellos ha depositado en mi persona para ser compartido. A Alberto, Ángel, Dany, Eddy, Gerardo, Glafira, Jaime, José Luis, Lucy, Luis, Luis Fernando, Manuel, Pedro, Silvia, Susie, Yolanda: por haber enriquecido la palabra amistad.

A mi amada familia, parte sustancial de mi vida. Mi inspiración y fortaleza.

A mi único anhelo.

Resumen

Con el objeto de obtener un mejor conocimiento sobre los yacimientos del agua en las cuencas del estado de San Luis Potosí, México, se presenta una propuesta que se encamina a definir una estrategia de distribución espacial del recurso, de manera a asociar las áreas en que éste se encuentra distribuido en la superficie del estado con los usos y aprovechamientos del mismo. El fin de esta estrategia, es de eficientar una adecuada planeación de perspectivas sustentables y la seguridad del recurso. Para tal efecto, se utilizó una metodología que permite estimar a través de procesos y análisis geoespaciales (uso de imágenes de satélite, SIG y análisis geoestadísticos), una serie de variables y parámetros permitiendo la conceptualización de un modelo de distribución espacial, que describe un patrón de comportamiento de los recursos hídricos coexistentes en las cuatro regiones del estado, en diversos periodos de años analizados de las últimas tres décadas.

Índice

Introducción	1
Problemática	3
Enfoque o tendencia de la problemática 1	3
Enfoque o tendencia de la problemática 2	5
Enfoque o tendencia de la problemática 3	7
Hipótesis	9
Objetivo general.....	9
Objetivos específicos	9
Sinopsis	10
Capítulo 1	
CONCEPTOS SOBRE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA, SEGURIDAD HÍDRICA Y EL DERECHO AL AGUA.....	11
1.1. Introducción	11
1.2. La gestión integral del agua	12
1.3. La seguridad hídrica.....	24
1.4. El derecho al agua.....	27
1.5. Estado del arte de la gestión integral del agua en el ámbito del manejo de información geográfica.....	48

Capítulo 2

ESTABLECIMIENTO DE UN ENFOQUE PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DEL AGUA A TRAVÉS DE MODELADO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL	56
2.1 Evaluación de la oportunidad.....	56
2.2 Conceptos de modelado espacial	64
2.3 Caso de estudio	73

Capítulo 3

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL AGUA SEGÚN LA DETERMINACIÓN DE VARIABLES	86
3.1 Introducción	86
3.2. Materiales y métodos	87
3.3. Área de estudio	89
3.4. Juegos de datos	91
3.5. Determinación de variables.....	92
3.7. Modelo de distribución espacial	126
3.8. Discusión.....	140
Referencias.....	142

Lista de figuras

Figura 1. Distribución espacial de la información proporcionada por CONAGUA	73
Figura 2. Histograma de los datos de evapotranspiración real para el año 1990	74
Figura 3. Gráfica Normal QQplot para los datos de evapotranspiración 1990	75
Figura 4. Análisis de tendencias	76
Figura 5. Kriging simple	78
Figura 6. Transformación Normal Score	79
Figura 7. Eliminación de las tendencias	79
Figura 8. Transformación Normal Score	80
Figura 9. Semivariograma resultante de la nube de puntos	81
Figura 10. Elipse de los cuatro sectores	81
Figura 11. Análisis de la distribución de datos respecto de la normal	82
Figura 12. Distribución de valores estimados	83
Figura 13. Herramienta Gaussian Geostatistical Simulations	84
Figura 14. ETR espacialmente distribuida para el estado de San Luis Potosí	84
Figura 15. Localización del área de estudio	89
Figura 16. Parámetros de corrección bajo el modelo FLAASH	96
Figura 17. Metodologías para el modelado espacial	97
Figura 18. NDWI para época de lluvia 1990	98
Figura 19. NDWI para época de lluvia 2000	98
Figura 20. NDWI para época de lluvia 2010	99
Figura 21. NDWI para época de lluvia 2015	99
Figura 22. NDWI para época de sequía 1990	100
Figura 23. NDWI para época de sequía 2000	101
Figura 24. NDWI para época de sequía 2010	101
Figura 25. NDWI para época de sequía 2015	102
Figura 26. NDWI para época de lluvia 1990	103
Figura 27. NDWI para época de lluvia 2000	104
Figura 28. NDWI para época de lluvia 2010	104
Figura 29. NDWI para época de lluvia 2015	105

Figura 31. NDWI para época de sequía 2000.....	105
Figura 32. NDWI para época de sequía 2010.....	106
Figura 33. NDWI para época de sequía 2015.....	106
Figura 34. PIB espacialmente distribuido.....	109
Figura 35. PIB espacialmente distribuido 2000.....	109
Figura 36. PIB espacialmente distribuid 2010.....	110
Figura 37. PIB espacialmente distribuido 2015.....	110
Figura 38. VSA espacialmente distribuido 1990.....	112
Figura 39. VSA espacialmente distribuido 2000.....	112
Figura 40. VSA espacialmente distribuido 2010.....	113
Figura 41. VSA espacialmente distribuido 2015.....	113
Figura 42. Uso del suelo espacialmente distribuido 1990.....	115
Figura 43. Uso del suelo espacialmente distribuido 2000.....	116
Figura 44. Uso del suelo espacialmente distribuido 2010.....	116
Figura 45. Uso del suelo espacialmente distribuido 2015.....	117
Figura 46. UAA Económico espacialmente distribuido.....	121
Figura 47. UAA Económico espacialmente distribuido 2000.....	121
Figura 48. UAA Económico espacialmente distribuido.....	122
Figura 49. UAA Económico espacialmente distribuido 2015.....	122
Figura 50. UAA Ecológico espacialmente distribuido 1990.....	124
Figura 51. UAA Económico espacialmente distribuido 2000.....	124
Figura 52. UAA Ecológico espacialmente distribuido 2010.....	125
Figura 53. UAA Económico espacialmente distribuido 2015.....	125
Figura 54. Proyección del uso y aprovechamiento ecológico del agua para el año 2050 en el estado de San Luis Potosí.....	137
Figura 55. Proyección del uso y aprovechamiento económico del agua para el año 2050 en el estado de San Luis Potosí.....	138

Introducción

Hoy en día, la problemática de la gestión del agua es un fenómeno internacional, situación que implica retomar esfuerzos para generar un mejor conocimiento del problema. Así mismo, es necesario considerar aspectos de la seguridad hídrica, manejando estrategias o mecanismos adecuados para una gestión integral sustentable del recurso. Según las políticas internacionales (PNUD, 2006), el adecuado uso y aprovechamiento del agua, es uno de los elementos que debería ser normalizado, ya que se involucra a un recurso necesario para la vida humana, el desarrollo económico y la diversidad ecológica. Debido a las múltiples cualidades inherentes del recurso hídrico (disponibilidad, calidad, vulnerabilidad, temperatura constante, propiedades, etc.), el suministro de agua en todas las regiones climáticas incluyendo zonas urbanas y rurales de los países desarrollados y en desarrollo (Todd y Mays, 2005), sigue siendo una problemática demográfica a atender y se ha convertido en una importante fuente de análisis a nivel científico. El Uso y Aprovechamiento del Agua (UAA) es un índice que pondera los beneficios que obtiene un sistema ecológico, económico o social por el consumo de agua, de tal manera que se puede clasificar en tres categorías: uso y aprovechamiento ecológico, uso y aprovechamiento económico, y el uso y aprovechamiento social.

Recientemente se ha incrementado el interés en conocer sobre el uso y aprovechamiento del agua, como un concepto asociado a la productividad, es decir, a la eficiencia demostrada en los resultados o beneficios obtenidos. Tradicionalmente se ha conocido como productividad a la relación entre la unidad de insumo y la unidad de resultado. En este caso el término productividad del agua es usado exclusivamente para denotar la cantidad o el valor del producto sobre el volumen o valor del agua consumida o desviada. El valor del producto puede ser expresado en diferentes términos: biomasa, grano, dinero (FAO, 2003). Ocina (2003) señaló que este indicador fue empleado para justificar la existencia y potenciación del regadío en determinadas zonas, o por el contrario, fue

considerada como un importante argumento para la justificación de la no inversión de nuevos regadíos.

Los beneficios obtenidos por el uso del agua adquieren cada vez mayor atención de los gobiernos, de los científicos, de los estudiosos del medio ambiente y de los encargados de su gestión. Un número creciente de autores han señalado que los recursos hídricos son fundamentales para el bienestar social y económico, como coinciden Randall (1981), Young (1985), Hutton (2004), Hajkowicz (2006), Fogden (2009), Bérenger (2007), Smajgl, Larson, Hug y Freitas (2010), Berry (2015), OCDE (2015) y UNESCO (2015) entre otros.

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos del cálculo del índice de uso y aprovechamiento del agua para el estado de San Luis Potosí, México y correspondiente a los años, 1995, 2000, 2010 y 2015. Tal estimación que se llevó a cabo a través de la generación de un modelado de distribución espacial es importante para ayudar a la toma de decisiones en el ámbito político, en las organizaciones que estudian al medio ambiente y en aquellas instancias profesionales encargadas del cuidado del agua. Por tal motivo y debido al crecimiento de la población, el deterioro del suelo, la mala calidad en el agua y la posibilidad de su agotamiento futuro, este modelo es una propuesta para colaborar en la comprensión de la necesidad de un adecuado manejo sustentable de los recursos hídricos y por consiguiente, para asegurar integralmente un sano desarrollo de los requerimientos hídricos de una sociedad.

El sustento de este análisis fue validado por diversos procesos rigurosos de información, la cual fué obtenida por métodos de teledetección e integrada con registros de datos históricos correspondientes a estudios que proporcionó la CONAGUA. De manera que se determinaron una serie de variables relativas al uso de suelo, la evapotranspiración, a la generación del producto interno bruto asociado a las actividades productivas requirientes de agua, al valor de lo requerido de los recursos hídricos necesarios en la biodiversidad del estado y la generación de un Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI), con el objeto de integrar a los diversos procesos y resultados del calculo de variables señaladas a

fin de obtener un modelo de distribución espacial que describa la situación actual del recurso hídrico en nuestro estado. El método fue desarrollado en dos épocas del año: período de lluvia y sequía.

Problemática

Luo (2003) sugirió que el índice de uso de agua se ha convertido en una herramienta esencial para el manejo sostenible de los recursos hídricos. Por otra parte, Huang (2013) consideró el beneficio social por el consumo de agua como un atributo de bienestar público de los recursos hídricos. Sin embargo, no existe un método universal para calcularlo; más aún, los estudios realizados son aplicados a las áreas urbanas, porque es difícil la implementación de estos estudios a escalas regionales. La evaluación y gestión de los recursos hídricos son inherentemente actividades geográficas que requieren el manejo de múltiples tipos de datos espaciales. Suele suceder que a veces es difícil trasladar los resultados de investigación hacia las estrategias de gestión, porque gran parte de la investigación hidrológica fundamental se lleva a cabo en sitios específicos o en áreas de estudio focalizadas.

Enfoque o tendencia de la problemática 1

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es la organización encargada en México de la supervisión y control de las agencias locales. Se ha delegado la gestión de las cuencas rurales a los Consejos de Cuenca; a la vez que se han ejecutado programas que fomentan la inversión en la infraestructura, su operación y mantenimiento.

Actualmente, menos de un 25% de los sistemas tienen plantas de tratamiento de aguas residuales y solo alrededor de un 22% de éstas son funcionales. Esto representa un desafío para garantizar el suministro del servicio de una manera eficiente y financieramente sostenible; inclusive desde el punto de vista ecológico. Por otra parte, es

necesario reconocer que existen grandes problemas de pérdidas del recurso a través de sus sistemas de distribución debido a las malas condiciones físicas, diseños no eficientes que podrían haber sido instalados con materiales y mano de obra inadecuados; considerar que gran parte del consumo urbano proviene de usuarios no registrados o bien, que el registro del consumo suele realizarse por medio de medidores que no funcionan adecuadamente.

Las concesiones a largo plazo para la perforación de pozos están sujetas al control gubernamental, principalmente para uso agrícola desde principios del siglo XX. Con el crecimiento urbano y el desarrollo industrial, las demandas de agua han propiciado el surgimiento de un mercado que ha llevado a la transferencia de algunos de estos derechos de agua con fines comerciales e industriales. Por último, es necesario emprender una campaña para concientizar a los usuarios y administradores sobre el diseño y mantenimiento de los sistemas de distribución urbana y los patrones de uso de agua en los hogares; para reutilizar el agua dentro de los hogares y para tratarla con propósitos agrícola e industrial. Se estima que, en conjunto, el sistema de aguas urbanas mexicanas tiene un coeficiente de eficiencia general inferior al 30%, basado en una pérdida de más de la mitad del agua distribuida a través de las redes y una tasa de recaudación de menos del 60% del agua facturada.

Probablemente las reformas al marco regulador propicien la descentralización para llevar al país hacia la gestión privada de los sistemas urbanos y la infraestructura hídrica. A ejemplo del Banco Mundial, la CONAGUA sostiene que el sector público carece de la capacidad administrativa, técnica y financiera para afrontar los desafíos de asegurar un suministro adecuado de agua de alta calidad y tratar los efluentes de aguas residuales para satisfacer las necesidades de la población.

Enfoque o tendencia de la problemática 2

Otro serio problema que aqueja al sector del agua es la falta de conocimiento y preocupación por el manejo ambiental y de las aguas residuales. Aunque la CONAGUA cuenta con un cuerpo de especialistas que han identificado el proceso de degradación ambiental sufrido en la mayoría de las cuencas mexicanas, no han podido comunicar un sentido de preocupación y urgencia a las autoridades de manejo hídrico a nivel local. No hay evaluaciones sistemáticas del impacto de las tendencias actuales del uso del agua sobre los ecosistemas o planes de contingencia ambientalmente racionales, en lugar de centrarse en una mejor gestión de los ecosistemas locales, promover la reutilización y reparaciones de los sistemas de distribución para hacer frente a la crisis de escasez de agua urbana, las estrategias oficiales exigen transferencias de agua entre las cuencas y la construcción de presas a gran escala, enfoques que históricamente han demostrado ser bastante dañinos y económicamente injustificables (Arrojo et al 2005, McCully, 2001). Por el lado de la demanda, las agencias de agua regularmente eligen extender sus áreas de recolección en lugar de modificar las prácticas de manejo de cuencas. Las estrategias de recolección y reciclaje de agua son prácticamente desconocidas en el sector público. Prácticamente no existe una preocupación real o una evaluación sistemática a largo plazo de los impactos ambientales y sociales de las descargas de aguas residuales no tratadas en las fuentes de agua de superficie. Una excepción notable es el plan de intercambio de aguas residuales tratadas de San Luis Potosí para el agua utilizada en torres de enfriamiento en una planta de generación de electricidad, como parte de la solución a problemas regionales de abastecimiento de agua.

México se enfrenta a peligros derivados de fuerzas naturales que han depositado a lo largo de la historia, importantes cantidades de sustancias potencialmente peligrosas en sus cuencas hidrográficas. Siglos de explotación minera, producción industrial, agrícola y comercial han dejado grandes volúmenes de sustancias tóxicas, susceptibles de filtrarse en los acuíferos a través de lixiviación o sedimentación. Existe una amplia evidencia de los peligros que estas sustancias representan, pero el gobierno no ha legislado

suficientemente contra su uso continuo, para hacer cumplir las restricciones existentes sobre su descarga o restringir su uso.

A escala nacional, menos de una cuarta parte de todo el consumo urbano pasa a través de una planta de tratamiento de agua, y una parte importante de éstas es inoperante. Numerosos estudios informan que las agencias locales no aseguran su correcta operación y mantenimiento; no pueden pagar el consumo de energía eléctrica y otros costos operativos que a menudo exceden los presupuestos municipales debido a la implementación de tecnologías y programas inadecuados de mantenimiento y modernización.

El tratamiento de aguas residuales es obligatorio por ley. Las industrias han hecho un esfuerzo por instalar plantas de reciclaje y tratamiento, también los municipios se ven obligados a administrar sus recursos financieros debido a una cultura de la no-recaudación por el suministro del recurso que prevalece en la mayor parte del país. Existe la oferta de servicios relacionados con el tratamiento por parte de proveedores corporativos de estas tecnologías, que ofrecen soluciones a los gestores locales del agua, quienes no pueden tomar decisiones óptimas porque están limitados por consideraciones financieras y administrativas, conocimientos tecnológicos inadecuados y la falta de una cultura ecológica. Las luchas políticas por los beneficios de las aguas grises no tratadas también impiden la búsqueda de soluciones. Como resultado, la aplicación de tecnologías para ofrecer soluciones ambiental y económicamente sólidas a la gestión del agua encuentra numerosos obstáculos para su implementación en México.

El uso y abuso de agua en las zonas urbanas está llevando a la destrucción del medio ambiente con consecuencias negativas para la salud pública y de los ecosistemas. En lugar de promover la nueva cultura del agua, el gobierno mexicano continúa llamando a los hogares para que resuelvan las fugas, mientras que, por otra parte, favorecen las transferencias entre cuencas y la construcción de infraestructura a gran escala para aumentar los suministros del recurso. Continúa ignorando las consecuencias que tienen las fuentes de contaminantes sobre la salud pública, mediante el fomento de nuevos

proyectos industriales y agrícolas que sólo intensificarán los problemas, mientras que, por otra parte, es claramente necesario apoyar las iniciativas para implementar nuevas tecnologías que podrían revertir las tendencias actuales.

Enfoque o tendencia de la problemática 3

Las características geográficas naturales del estado de San Luis Potosí determinan una baja disponibilidad del recurso al presentarse un bajo ritmo de precipitaciones respecto a las necesidades de abastecimiento, el desorden y las malas prácticas de explotación y gestión ante la falta de una adecuada regulación. La tendencia en la gestión del agua que se observa a nivel nacional e incluso internacional, se replica en la entidad al presentarse la sobreexplotación de los acuíferos sin la aplicación de criterios de una planificación capaz de prevenir una crisis que no se resolverá con medidas administrativas ni jurídicas. Es necesario reconocer que el daño ocasionado a las reservas naturales es irreversible, considerando que la tasa de aumento demográfico incrementará también la demanda del recurso. La experiencia ha demostrado que un adecuado marco regulatorio no bastará para resarcir la afectación a las fuentes naturales, más aún si se considera que la implementación de las medidas propuestas dependen también de criterios políticos y económicos que frecuentemente rebasan la responsabilidad de un adecuado manejo. La implementación de un pago de derechos limita la autonomía financiera, afectando la capacidad de adoptar las decisiones adecuadas para garantizar la sustentabilidad del recurso.

En el Estado, la Huasteca Potosina se caracteriza por abundancia de ríos y precipitaciones pluviales, por lo que parece irónica la existencia de algunas comunidades que no reciben agua potable, abasteciéndose de agua de norias sin ningún proceso químico. Esta situación existe debido a que los organismos operadores abastecen de agua potable principalmente a las cabeceras municipales, y comunidades aledañas. Desprotegiendo a las comunidades más distantes; la atención del servicio de agua en las comunidades de la

Huasteca Potosina es de un alarmante 10% en contraposición con el 25, 15 y 18% del Altiplano, Centro y Zona Media, motivo por el cual es urgente realizar acciones que gestionen una distribución justa y equitativa para que todas las personas que habitan en estas comunidades tengan acceso al vital líquido.

Según la CONAGUA (2011), la actividad agrícola consume el 77% del agua disponible; el 22.9% se distribuye hacia otras actividades como el sector público (13.9%) y la industria (9%). Por otro lado, una tercera parte del agua concesionada para el uso agropecuario, que agrupa los usos agrícola, acuacultura, pecuario, múltiple y otros, es de origen subterráneo. En los últimos 20 años la agricultura mexicana creció por debajo de la economía nacional: en el período de 1993-2000, el PIB agrícola creció 2.7% promedio anual, mientras que en el ciclo 2000-2011 su incremento ha sido de 1.1% promedio anual (INEGI, 2012).

Lo anterior expone que la distribución del recurso se realiza en forma desproporcionada, y que la competencia por el control de la gobernanza a los diferentes niveles deriva en una falta de cooperación entre los responsables del servicio, antes de compartir intereses y objetivos, por lo cual la problemática no tiende a encontrar la solución más eficaz, mientras que los niveles freáticos continúan decreciendo, situación que no alcanzará a solucionarse desde la perspectiva económica, sin adoptar una visión integral del problema.

Hipótesis

La realización de un análisis espacial del agua a escala de las cuencas del estado de San Luis Potosí, permitirá estudiar las variables asociadas, para obtener una estimación de los usos y aprovechamientos del recurso de las últimas tres décadas a través de la determinación de un modelo de distribución espacial.

Objetivo general

Determinar un modelo para el análisis de la distribución espacial del agua a la escala de las cuencas del estado de San Luis Potosí, que sea útil como herramienta para el manejo sostenible del recurso hídrico.

Objetivos específicos

- I. Determinar las variables a integrar al proceso de modelado de distribución espacial.
- II. Utilizar un SIG para definir las cuencas y subcuencas del Estado de San Luis Potosí.
- III. Integrar un mosaico de imágenes registradas por sensores satelitales cubriendo el estado de San Luis Potosí.
- IV. Calcular el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).
- V. Generar el Modelo de Distribución Espacial.

Sinopsis

Los seres humanos intervienen la naturaleza del ciclo hidrológico con el propósito de obtener un beneficio por el consumo del agua. El índice de uso de agua se reconoce como la relación entre el consumo y el beneficio obtenido. Huang, Jiang, Zhuang, Zhu, & Fu (2014) presentaron una metodología para el cálculo del índice de uso y aprovechamiento del agua a escala de la cuenca Yellow River, en China; sin embargo, cabe hacer notar que el caso de referencia fue aplicado a solo una cuenca geomorfológica, además de limitarse exclusivamente al año 2005.

El presente estudio es una adaptación del método para las condiciones físicas, ecológicas y socioeconómicas de todas las cuencas que integran el estado de San Luis Potosí, S.L.P, México; en tanto que los resultados que se presentan corresponden a los años 1990, 2000, 2010, 2015; más aún, éstos incluyen los análisis para las temporadas de lluvia y sequía de cada uno de ellos. De manera que se desarrolló un estudio multi-temporal considerando unas variables asociadas a las condiciones físicas, geomorfológicas y geográficas del estado.

El capítulo 1 de este trabajo de tesis versará sobre la profundización de una problemática mundial y que atañe a nuestro país, de manera que se hará una descripción sobre la gestión integral del agua, la seguridad hídrica y el derecho a la misma.

En el capítulo 2 se describirá sobre las tendencias del manejo sustentable del agua con el enfoque de utilizar procesos con el uso de tecnologías geoespaciales para el modelado de la distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua.

El capítulo 3 describe la metodología utilizada para el desarrollo de un modelo de distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua con procesos geoestadísticos aplicados en el estado de San Luis Potosí.

Capítulo 1

CONCEPTOS SOBRE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA, SEGURIDAD HÍDRICA Y EL DERECHO AL AGUA.

1.1 Introducción

Una adecuada gestión en el uso del agua es una forma de aliviar la presión que existe sobre la demanda y el conflicto de las necesidades de los usuarios, mediante la utilización más eficaz de cada unidad del suministro existente. El uso eficiente del agua puede conducir a la reducción general del consumo total de agua, a una mayor productividad económica o a otros beneficios, por ejemplo, necesidades domésticas adecuadamente satisfechas, el rendimiento de los cultivos o los ingresos por unidad de agua.

El desarrollo, la adopción y difusión de uso de tecnologías innovadoras, que permitan fomentar cambios en las prácticas del manejo de recursos hídricos, podrían generar nuevas estrategias, como por ejemplo para la reducción de pérdidas por fugas dentro de los sistemas de distribución y otras diversas problemáticas.

Aunado a tales perspectivas, es necesario que se fomente un adecuado intercambio de información sobre el recurso para servicio de las entidades gubernamentales, las instituciones educativas, los desarrolladores y para los usos en la investigación de manera a colaborar en la adecuada toma de decisiones.

1.2 La gestión integral del agua

El interés de la humanidad en el manejo adecuado del agua dulce radica en la importancia que se tiene como elemento precursor, constituyente esencial de la materia viva y fuente de hidrógeno para los organismos. También porque del equilibrio del ciclo hidrológico depende la funcionalidad de los ecosistemas acuáticos y terrestres.

Las actividades humanas han intervenido el ciclo del agua en la búsqueda de dar satisfacción a sus necesidades, alterando el clima y la química de la Tierra, modificando la configuración del suelo y su vegetación, reduciendo su capacidad de almacenamiento; o bien removiendo rocas y sedimentos, lo cual llega a causar erosiones, afectando la infiltración del recurso hacia el subsuelo, todo esto, con la excesiva extracción, genera déficit en algunas regiones y como consecuencia, una serie de problemas que han sido reconocidos por científicos investigadores, gestores del recurso y asociaciones no gubernamentales en numerosas reuniones internacionales. La diversidad de culturas, sistemas físicos y ambientales así como la irregular distribución de la población en el planeta, generan consecuencias desiguales que implican conflictos por el uso del recurso.

La crisis del agua está relacionada con una serie de conflictos generados o por generarse por el acceso al líquido, los cuales pueden ser a diferentes niveles y escalas; se presentan a nivel de localidades, por los límites político-administrativos al interior de un país, disputas fronterizas entre países; pueden ser económicos o políticos y abordarse de manera diplomática o violenta (Gleick, 1993).

Como resultado del Segundo Foro Mundial del Agua, celebrado en La Haya en el año 2000, se produjo un documento que reconoce la crisis mundial de este recurso, sin embargo, asevera que el mismo “no radica en que sea insuficiente para satisfacer nuestras necesidades. Se debe a que se maneja tan mal que miles de millones de personas, y el medio ambiente, sufren enormemente” (Cosgrove y Rijsberman, 2000).

Conforme al planteamiento del Consejo Mundial del Agua (World Water Council, WWC), hasta hace poco tiempo, la gestión de los recursos hídricos se centraba en forma

casi exclusiva en la distribución del agua cuando y donde las personas la necesitaban. Metodología diseñada considerando únicamente la oferta (Cosgrove y Rijsberman WWC, 2016). Sin embargo, a medida que se incrementa el consumo per cápita y se afectan los ecosistemas, se incrementa la necesidad de conocer y gestionar las demandas de manera integral.

De acuerdo con información publicada por la FAO, el volumen anual de agua precipitada es de 110,000 Km³ en promedio, de éstos, unos 70,000 Km³ son retenidos de manera inmediata por la zona no saturada, agua que tiende a evaporarse directamente desde el suelo o por la transpiración de las plantas, y que permite la existencia de la vegetación natural (bosques, praderas, matorrales, tundra, etc.), así como los cultivos de temporal. Aunque no se ubica con facilidad información que permita establecer una estimación aceptable sobre su distribución (Cosgrove y Rijsberman, 2016), Allen (2006) estima un volumen de aprovechamiento para los cultivos de secano o temporal del orden de 30,000 a 40,000 Km³. Los ecosistemas naturales y la agricultura dependen de ella y produce el 60% de los alimentos en todo el mundo, por ello, recibe el nombre de agua verde (Cosgrove y Rijsberman, 2016). FAO AQUASTAT (2003, 2004) identifica como agua azul a los recursos renovables de un país: agua de los ríos, lagos y acuíferos. Esta es la parte del ciclo hidrológico que los seres humanos hemos tratado de modificar con la construcción de embalses y canales. Este recurso es el que se aprovecha para la satisfacción de las necesidades del resto de los seres vivos y comunidades terrestres. De los 40,000 Km³ estimados de agua azul, unos 3,800 Km³ fueron bombeados o desviados de su origen natural para usos humanos (Shiklomanov 1999); mientras que unos 2,100 Km³ fueron consumidos y el resto se reincorporaron a los cauces naturales y acuíferos (WWC, 2016). Por otra parte, se estima que el volumen anual de agua accesible para uso humano es del orden de 9,500 Km³; el resto del agua azul es considerado de difícil acceso y requiere de una regulación orientada a garantizar su disponibilidad donde sea necesaria (FAO, 2016).

Ahora bien, aunque el volumen de agua extraída o desviada se estima en alrededor del 10% del agua renovable, mientras que el agua consumida es del orden del 5%, estas

cifras no necesariamente indican que el uso sea una porción mínima de los recursos disponibles, si se considera lo siguiente:

1. La ubicación del agua no es análoga a la distribución de la población. Así pues, existen zonas del planeta con una alta disponibilidad de agua y con una baja densidad de población. Tal es el caso de la cuenca del Amazonas, Canadá y Alaska.
2. Las precipitaciones de altas concentraciones en períodos de tiempo breve, no permiten un alto aprovechamiento, a no ser que sean almacenadas.
3. Existe un volumen de agua que al ser contaminada o deteriorada en su calidad inhibe su aprovechamiento.
4. El agua que no es utilizada como satisfactor de las necesidades humanas, es utilizada aguas abajo por los ecosistemas acuáticos y terrestres.
5. En cuencas áridas o semiáridas, el aprovechamiento del recurso disponible puede alcanzar cifras hasta un 80 o 90%.
6. La meteorología de algunas cuencas fluviales registra temporadas con altas concentraciones, las cuales no alcanzan a ser aprovechadas a lo largo del año debido a la falta de infraestructura para proteger y almacenar el recurso.

La Asociación Mundial del Agua (Global Water Partnership, GWP), define la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH) como:

“Un proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados con el fin de maximizar el bienestar social económico resultante de manera equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales” (Global Water Partnership, 2000).

Esto representa una nueva forma de considerar los diferentes factores que afectan a la disponibilidad del recurso hídrico, así como las modificaciones que estos imprimen al

entorno a nivel de la cuenca hidrológica. Para ello es necesario reconocer el uso del suelo y aprovechamiento de los recursos hídricos, tanto superficiales como subterráneos que existen en la misma e integrarlos con las necesidades sociales a fin de obtener beneficios equitativos en las diferentes necesidades, es decir, que los servicios de agua potable y saneamiento para una población, el destino hacia la agricultura, la industria, etc., deben ser considerados en su conjunto y tomando en cuenta los efectos que cada uno de ellos tiene sobre los otros (Cosgrove et al, 2014). Como señala la Red Internacional para el Desarrollo de Capacidades en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo: “La idea fundamental de la GIRH es que los diferentes usos del agua son interdependientes, por lo que es necesario considerarlos de manera conjunta” (UNEP, 2012).

La GIRH está fundamentada con base en el hecho de que los recursos hídricos son un componente esencial de los ecosistemas y como tal, reconoce la importancia que tienen como recurso natural que se convierte en un bien social, ambiental y económico, pues en todos sus usos adquiere un valor monetario. Por tal razón, la implementación de la GIRH implica reformar los sistemas de manejo del recurso a fin de garantizar que los beneficios sociales sean sostenibles e igualitarios. Para realizar esto, es necesario que los gestores, tanto gubernamentales como del sector privado, tomen decisiones complicadas sobre la asignación y el manejo del agua. La GIRH es aceptada internacionalmente como el camino hacia un desarrollo y gestión eficientes, equitativos y sostenibles de unos recursos hídricos cada vez más limitados y para abordar una demandas en competencia (UN-WATER, 2016). A pesar del amplio reconocimiento de este enfoque, existen diversos obstáculos que han impedido su implementación efectiva, entre los que se destaca la falta de herramientas que permitan establecer metas claras y evaluar el progreso de las acciones (Pahl-Wostl et al, 2005). Por otra parte, Bigas (2012) señala que “es la lentitud de los ajustes institucionales ante la escasez hídrica lo que ha hecho de la crisis mundial del agua una crisis de gobernanza, más que una crisis de disponibilidad absoluta de agua. No nos enfrentamos tanto a la escasez como a las cuestiones de gobernanza del agua”.

En el año de 1992 se celebró en la ciudad de Dublín la Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA), de la cual surgió la llamada Declaración de Dublín sobre Agua y Desarrollo Sostenible. La Conferencia enfatiza la necesidad de adoptar medidas a nivel local, nacional e internacional sobre cuatro principios rectores, que a su vez, han sido reconocidos como los principios básicos de la GIRH:

Principio N° 1. El agua dulce es un recurso finito y vulnerable, esencial para sostener la vida, el desarrollo y el ambiente. Desde que el agua es la base de la vida, su manejo efectivo demanda un enfoque holístico, vinculando desarrollo social, económico y protección de los ecosistemas naturales.

Principio N° 2. El desarrollo y manejo del agua debe inspirarse en un planteamiento participativo que incluya a los usuarios, los planificadores y los responsables de las decisiones a todos los niveles. El enfoque participativo involucra la concientización sobre la importancia del agua entre políticos y público en general.

Principio N° 3. La mujer desempeña un papel fundamental en el abastecimiento, el manejo y la protección del agua. El rol protagónico de la mujer como proveedora y usuario del agua ha sido pocas veces reflejado en los arreglos institucionales para el manejo de este recurso.

Principio N° 4. El agua tiene un valor económico en todos sus diversos usos en competencia a los que se destina y debería reconocérsele como un bien económico. Dentro de este principio, es vital reconocer primero el derecho básico de toda la humanidad para tener acceso a agua potable y saneamiento a un precio alcanzable. Estos principios enfatizaron, desde hace 24 años, la necesidad de realizar una adecuada GIRH en el planeta.

De acuerdo con el WWC, para el siglo XXI el manejo del agua presenta seis desafíos: la escasez, el deterioro de su calidad, la inaccesibilidad, la adecuada gestión a nivel gubernamental, los recursos financieros a la baja y un manejo fragmentado. Se considera

además que para conseguir que la GIRH impacte sosteniblemente tanto a nivel social - económico como ambiental, se requiere que las políticas de manejo consideren las implicaciones que éstas propician a nivel macroeconómico; que exista una integración transversal del agua en la política de desarrollo; las decisiones locales a nivel cuenca estén en línea con los objetivos nacionales, y que los planes y estrategias del agua estén integradas en las metas sociales, económicas y ambientales de cada país (GWP, 2004).

La Asociación Mundial del Agua señala los siguientes principios y políticas como bases para el desarrollo de planes nacionales en América Latina (Pochat, 2008):

El agua es un recurso finito, vulnerable e indispensable para la vida de los seres humanos y de la naturaleza. Y un insumo imprescindible en numerosos procesos productivos, por lo que debe ser necesariamente contemplado, tanto en los planes específicos de gestión de los recursos hídricos, como en cualquier plan general y sectorial de cada país relacionado con la protección del ambiente y el desarrollo social y económico.

1. El agua es un recurso único y móvil con distintas fases (atmosférica, superficial y subterránea). Al desplazarse en el espacio, relaciona entre sí y con los seres humanos a los otros componentes del ambiente. Por lo tanto, la gestión de sus distintas fases debe realizarse en forma conjunta, teniendo en cuenta las actividades que se realicen aguas arriba con las de aguas abajo en los distintos cuerpos de agua, articulando coherentemente la gestión hídrica con la gestión ambiental.
2. El agua es un recurso de ocurrencia variable tanto espacial como temporalmente. Por lo tanto, para disponer de ese recurso en los lugares en que se le requiera y en el momento oportuno, los planes de gestión deberán contemplar la construcción y mantenimiento de obras hidráulicas de retención y conducción, con la debida consideración de sus respectivos impactos sociales, ambientales y económicos.
3. El agua se desplaza sobre la superficie del terreno dentro de un espacio (la cuenca hidrográfica), y bajo la superficie. De acuerdo con las características geológicas

de los acuíferos. Dado que el movimiento de las aguas responde a leyes físicas y no reconoce fronteras político-administrativas, las cuencas hidrográficas y los acuíferos constituyen la unidad territorial más apta para la planificación y gestión de los recursos hídricos. Los análisis y discusiones sobre la asignación del recurso hídrico entre los distintos usuarios y el ecosistema se facilitan al encararse a nivel de cuenca, donde tiene lugar gran parte de la “integración” contemplada por la GIRH. Cabe señalar, sin embargo, que muchas decisiones que afectan a la gestión de los recursos hídricos –dentro de un sector o entre sectores, tal como producción de alimentos, minería, salud y energía, entre otros–, sólo pueden tomarse a nivel de país y no a nivel de cuenca, o aun dentro del sector hídrico. Consecuentemente, ambos niveles de decisión son complementarios y concurrentes; están estrechamente interrelacionados y ambos deberán confluir a una gestión más adecuada.

4. El agua tiene usos múltiples al estar relacionada con el ambiente. Y con todos los sectores sociales y económicos. Las demandas de agua para el consumo humano básico y la sostenibilidad ambiental son prioritarias sobre todo otro uso. El resto de las demandas será satisfecho conforme a las prioridades establecidas por cada país o región. La consideración de la totalidad de las ofertas y demandas de agua en una cuenca permite detectar las mejores oportunidades para su uso —sobre la base de una valoración social, ambiental y económica–, lográndose al mismo tiempo minimizar impactos negativos a terceros o al ambiente y anticipar conflictos. Por lo que se requiere articular la planificación hídrica con la planificación ambiental y la planificación del desarrollo social y económico.
5. Los cursos de agua superficial y los acuíferos trascienden los límites de una determinada jurisdicción política (municipio, entidad federal o país), constituyendo sus aguas un recurso hídrico compartido por dos o más jurisdicciones, cuyo uso y protección requerirá una gestión coordinada y consensuada. Los recursos hídricos compartidos por dos o más países deben gestionarse de acuerdo con los principios internacionalmente aceptados de uso

equitativo y razonable, obligación de no ocasionar perjuicio sensible y deber de información y consulta previa entre las partes, con la debida consideración de las cuestiones de soberanía.

6. Las múltiples actividades que se desarrollan en un territorio afectan de una u otra forma a sus recursos hídricos. De ahí la necesidad de vinculación entre la gestión hídrica y la gestión territorial, recurriendo a prácticas sostenibles en todas las actividades que se desarrollen en las cuencas hídricas. Al mismo tiempo, exige que el sector hídrico intervenga en las decisiones sobre el uso del territorio e imponga medidas de mitigación y restricciones al uso del suelo cuando pudiera conducir a impactos inaceptables sobre los recursos hídricos.
7. El agua se transforma. En ocasiones, en factor de riesgo ante situaciones asociadas tanto a fenómenos de excedencia como de escasez hídrica, a contaminación y a fallas de la infraestructura. Por su interacción con las actividades de las personas, puede ocasionar daños y hasta pérdidas de vidas humanas y serios perjuicios a los sistemas social, ambiental y económico. La gestión territorial deberá respetar las restricciones que el medio natural impone y, al mismo tiempo, se deberá desarrollar la normativa, los planes de contingencia y la infraestructura que permitan prevenir y mitigar los impactos negativos causados por aquellas situaciones.
8. La dimensión ética en la gestión de los recursos hídricos. Se logrará incorporando a la gestión diaria la equidad, la participación efectiva, la comunicación, el conocimiento, la transparencia y especialmente la capacidad de respuesta a las necesidades humanas que se planteen. Para alcanzar la plena gobernabilidad del sector hídrico, se requiere del compromiso y el accionar conjunto de los organismos de gobierno y de los usuarios del agua para democratizar todas las instancias de la gestión hídrica, hacer uso de los respectivos conocimientos y experiencia para aportar eficacia y eficiencia a dicha gestión y asegurar el control social que evite la corrupción. Se debe fomentar la participación efectiva de toda

la sociedad, tanto en la definición de objetivos comunes para la planificación hídrica como en el proceso de toma de decisiones y en el control de la gestión, en un ejercicio de verdadera responsabilidad compartida. La descentralización de funciones debe alcanzar el nivel local más próximo al usuario del agua que resulte apropiado, promoviendo la participación de organizaciones comunitarias en la gestión del agua. La construcción de consensos y el manejo de los conflictos constituyen pilares centrales de la gestión integrada de los recursos hídricos.

9. El logro de los objetivos de la planificación hídrica se alcanza mediante la adecuada combinación de acciones estructurales (construcción de infraestructura) y de medidas no estructurales (de gestión y tecnológicas, y disposiciones legales y reglamentarias que complementen o sustituyan las obras físicas, tales como normas y medidas para mejorar la eficiencia de uso del agua y tecnologías para disminuir el riesgo hídrico). Todo esto pone en evidencia que, a nivel global, hoy existe una concientización de la importancia del uso del agua, lo cual se demuestra en la implementación e incremento de la cultura del cuidado del recurso. Más aún, en México, que tiene una población de 119,530,753 habitantes (INEGI, 2015), el tema del agua fue declarado por el gobierno a principios del presente milenio como un tema de interés nacional. Mientras que en 2003, la Comisión Nacional del Agua publicaba que 101 acuíferos (16.83%) de un total de 600, estaban siendo sobre explotados (DOF, 2003); en diciembre de 2013, a la vez que modificaba los límites de algunos de ellos, dio a conocer que 192 acuíferos (29.40%) de un total de 653 se encontraban bajo esta condición (DOF, 2013).

México cuenta con una amplia trayectoria en el manejo del agua, bien documentada, que data épocas prehispánicas; atravesando en la actualidad una situación crítica debido a la presión antropogénica (Aldama, 2004; Perló y González, 2005). Sin embargo, la gestión del agua se ha aplicado en una forma discontinua, sin un enfoque integral. Esta situación ha provocado una problemática caracterizada por servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento deficientes e incluso en ocasiones inexistentes para la población tanto urbana como rural; contaminación de cuerpos de agua por descargas residuales sin

tratamiento; daños por inundaciones y sequías, conflictos entre usuarios por las fuentes de abastecimiento de agua, sobreexplotación de acuíferos, uso ineficiente de agua en núcleos urbanos y algunos otros problemas locales (Breña y Breña, 2007).

Se argumenta que en México, la presión sobre el recurso es causado por el crecimiento poblacional y económico lo que ha causado que el volumen de agua demandado sea siempre mayor al suministrado, por lo cual el gobierno se ve obligado a decidir a quien dejar sin el recurso (Santacruz, 2007), por otra parte, es importante considerar la opinión de otros autores que opinan que la escasez del agua se relaciona con una carencia de acceso al recurso (Patrick, 1994; Rijsberman y Scott, 2005), además de una falta de administración adecuada de los recursos hídricos (Rijsberman y Scott, 2005).

Santacruz (2007) identifica dos períodos históricos en la gestión oficial del agua en México: el primero, desde fines del siglo XIX hasta los primeros años de la década de los años 90 del siglo XX. En esta fase, en 1917, se creó la Secretaría de Agricultura y Fomento, y posteriormente, la Comisión Nacional de Irrigación, para ordenar el uso de los recursos suelo y agua en el país (Aboites, 1998). Para instrumentar la política de desarrollo regional y el manejo eficiente de los recursos naturales en el país se crearon a partir de 1947 siete comisiones de cuencas hidrográficas, las cuales fueron organismos descentralizados de la Secretaría de Recursos Hidráulicos (Tortolero, 2000). El segundo período abarca desde los primeros años de la década de los años 90 del siglo XX. Este período es resultado de la crisis fiscal del Estado, de la apertura comercial y la incorporación de mecanismos de mercado; pero sostenido, sobre todo más en el papel que en la práctica, por la búsqueda de una mejor distribución de agua, un uso eficiente de ésta, y la participación social y política de la sociedad en la gestión del líquido (López, 2005; Vargas, 2004). En este período se crea, por Decreto Presidencial de fecha 16 de enero de 1989, la Comisión Nacional del Agua (CNA), actualmente CONAGUA. En 2004, se reforma y adicionan diversas disposiciones a la Ley de Aguas Nacionales (LAN) y se impulsa a la Comisión Nacional del Agua como la autoridad del agua, apoyada según estas reformas, por los Organismos de Cuenca. Esta ley reformada introduce conceptos como gestión del agua, gestión integrada de los recursos hídricos, mercados y

bancos del agua; considera al agua como un bien de dominio público, vital vulnerable, finito, con valor económico; y que está en manos, sobre todo del Estado y de la sociedad preservar su calidad y cantidad. Santacruz (2007).

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) establece el marco jurídico para la Gestión Oficial del Agua en México (Honorable Cámara de Diputados, 2016). En su artículo 3, fracción XXIX define la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos como:

“...proceso que promueve la gestión y desarrollo coordinado del agua, la tierra, los recursos relacionados con éstos y el ambiente, con el fin de maximizar el bienestar social y económico equitativamente sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales. Dicha gestión está íntimamente vinculada con el desarrollo sustentable. Para la aplicación de esta Ley en relación con este concepto se consideran primordialmente agua y bosque.”

Este marco jurídico privilegia el enfoque integral; sin embargo, en la práctica de la gestión oficial del agua, el enfoque extractivo es el que prevalece. En la LAN se establece que la Gestión del Agua debe entenderse como un proceso sustentado en el conjunto de principios, políticas, actos, recursos, instrumentos, normas formales y no formales, bienes, recursos, derechos, atribuciones y responsabilidades, mediante el cual coordinadamente el Estado, los usuarios del agua y las organizaciones de la sociedad, promueven e instrumentan para lograr el desarrollo sustentable en beneficio de los seres humanos y su medio social, económico y ambiental, (1) el control y manejo del agua y las cuencas hidrológicas, incluyendo los acuíferos, por ende su distribución y administración; (2) la regulación de la explotación, uso o aprovechamiento del agua; u (3) la preservación y sustentabilidad de los recursos hídricos en cantidad y calidad, considerando los riesgos ante la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios y daños a ecosistemas vitales y al medio ambiente. Sin embargo, esta Ley establece que la gestión del agua comprende, en su totalidad, a la administración gubernamental del agua (DOF, 2016).

Con base en todo lo anterior se considera que la GIRH puede utilizar diversas disciplinas científicas y tecnológicas que planteen una perspectiva integral en todas las dimensiones del caso a fin de participar en el proceso de resolución de los problemas relacionados con el aprovechamiento del recurso de manera sostenible social, económica y ambientalmente.

1.3 La seguridad hídrica

“Incrementar la seguridad hídrica se ha convertido en un imperativo para el desarrollo. Es mucho lo que está en juego y necesitamos cuestionarnos los caminos de desarrollo y abrirnos paso a través de la creciente complejidad de la gestión del agua con claves para el éxito que nos hagan avanzar.”

Dra. Letitia A. Obeng, Presidente de la GWP

Las crisis que se han presentado alrededor del mundo (económicas, alimentarias, sociales, climáticas, hídricas, etc.), pueden encontrarse relacionadas entre sí en más de una ocasión y representan un importante desafío que puede ser confrontado en un sentido positivo para el progreso de la humanidad. Hemos reconocido que las sociedades industrializadas actuales afectan a la sostenibilidad de los recursos del planeta, a la economía e incluso a la estabilidad política, de tal manera que la unión de asuntos económicos y naturales ha creado importantes oportunidades para proponer cambios sociales, institucionales, económicos, tecnológicos, etc.

La seguridad del agua es una necesidad de toda la sociedad, pues es necesario que tal recurso sea gestionado de forma sostenible a través de un enfoque interdisciplinario, de manera que contribuya al desarrollo socio-económico y refuerce la resistencia a los impactos ambientales, así como a enfermedades transmitidas por el agua, sin comprometer la salud presente y futura de las poblaciones y los ecosistemas. La seguridad del agua requiere su disponibilidad para todos los usuarios de manera justa, eficiente y transparente; que el agua sea accesible a todos para satisfacer las necesidades humanas básicas a un precio razonable para el usuario; que el recurso a lo largo del ciclo del agua sea almacenada y tratada para prevenir su contaminación y las posibles enfermedades que ésta ocasiona; también que existan mecanismos justos, accesibles y eficaces para gestionar o conducir los conflictos que puedan surgir. El concepto debe aplicarse a todos los niveles, desde el individuo, el hogar y la comunidad hasta el local,

regional, estatal, nacional e internacional; y tomar en cuenta la variabilidad de la disponibilidad de agua en el tiempo.

El plan estratégico del Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la UNESCO, aprobado en la 20ª reunión del Consejo Intergubernamental del PHI (Resolución XX-5), define la seguridad del agua como la capacidad de una población para salvaguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, el bienestar humano y el desarrollo socio-económico, para garantizar la protección contra la contaminación y los desastres relacionados con el agua, y para la conservación de los ecosistemas en un clima de paz y estabilidad política. (ONU-Agua, 2013).

Según el Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo (WWAP) 2016, la seguridad hídrica se encuentra bajo presión severa debido a varios factores, por mencionar algunos: el crecimiento demográfico mundial, las rápidas modificaciones de régimen de áreas rurales a urbanas, el impacto de los cambios alimenticios a medida que los países se desarrollan, la contaminación creciente de los recursos, la sobre-extracción y los retos climáticos agravados por el calentamiento global expresados en inundaciones y sequías más frecuentes y severas, así como en alteraciones de los patrones de lluvia y de flujo de los ríos.

Por otra parte, un número creciente de expertos coinciden en señalar que detrás de los conflictos bélicos de algunos países como Libia, Egipto, Yemen, Siria, Arabia Saudita o Irak se encuentra una disputa por el recurso. Glass N., (2003); Gleick P., (1993), (2003) y (2008); y Starr, J., (1991).

El agua es considerada hasta cierta parte como una mercancía, sometida a las leyes económicas del mercado, y por otro lado, como una necesidad tan elemental que la constituye como un derecho humano para su posterior incorporación a los textos normativos, especialmente a los constitucionales. La determinación de una u otra postura está condicionada por factores culturales, sociales e ideológicos. De tal manera que la

consideración jurídica del agua oscila entre la de ser considerada como un bien de la humanidad, de dominio público o un simple bien comercial.

Se estima que el 85% de la población mundial habita en la mitad más árida de la Tierra (Vorosmarty, 2005) y que para el 2030 la mitad de ella se encontrará en zonas con elevado estrés hídrico (OECD, 2008). Cerca de 1,200 millones de personas (casi una quinta parte de la población mundial) vive en áreas donde el agua escasea físicamente, mientras que 500 millones se aproximan a esta situación. 2,600 millones de personas, es decir, el 39% de la población mundial viven sin acceso a saneamiento (UN-Water y FAO, 2007). Entre 6 y 8 millones de personas al año mueren por desastres o enfermedades asociadas con el agua (UN-Water, 2013). De acuerdo con el IPCC (2014), el cambio climático ha modificado el ciclo hidrológico, esperando un impacto mayor en el futuro. Para afrontar la crisis, la comunidad internacional ha debido tomar conciencia de que el acceso al agua potable y saneamiento deben encuadrarse en el marco de los derechos humanos.

1.4 El derecho al agua

El agua es fundamental para el desarrollo sostenible, en particular para la integridad del medio ambiente y la erradicación de la pobreza y el hambre, y es indispensable para la salud y el bienestar del ser humano (ONU, 2004). El acceso al agua limpia y saneamiento puede promover o retrasar el desarrollo humano, determinando lo que las personas pueden o no hacer; es decir, sus capacidades. Según el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente en el mundo, cada día más niños mueren por falta de agua limpia, y la ausencia de agua y saneamiento básico causa más muertes que cualquier otra forma de violencia, incluyendo las guerras (UNEP, 2010). Como señala el Programa Conjunto OMS/UNICEF de Monitoreo, el agua potable y el saneamiento pueden definirse de la siguiente manera:

Agua potable. Utilizada para los fines domésticos y la higiene personal, así como para beber y cocinar; se considera que se tiene acceso al agua potable si la fuente de la misma se encuentra a menos de 1 kilómetro de distancia del lugar de utilización y si se puede obtener de manera fiable al menos 20 litros por día para cada miembro de la familia.

Salubridad. El agua debe cumplir con características microbianas, químicas y físicas según las pautas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) o los patrones nacionales sobre la calidad del agua potable. Por acceso al agua potable salubre se entiende el porcentaje de personas que utilizan las mejores fuentes de agua potable, a saber: conexión domiciliaria, fuente pública, pozo de sondeo, pozo excavado protegido, surgente protegida, aguas pluviales.

Saneamiento básico. Tecnología de más bajo costo que permite eliminar higiénicamente las excretas y aguas residuales, para tener un medio ambiente limpio y sano tanto en la vivienda, como en las proximidades de los usuarios. El acceso al saneamiento básico comprende seguridad y privacidad en el uso de estos servicios.

Cobertura. Se refiere al porcentaje de personas que utilizan mejores servicios de saneamiento, por ejemplo: conexión a alcantarillas públicas, conexión a sistemas

sépticos, letrina de sifón, letrina de pozo sencilla, letrina de pozo con ventilación mejorada (PCM, 2010).

Cerca de 1,200 millones de personas, es decir, casi una quinta parte de la población mundial, vive en áreas donde el agua escasea físicamente, mientras que 500 millones se aproximan a esta situación. 2,600 millones de personas, es decir, el 39% de la población mundial viven sin acceso a saneamiento (UN-Water y FAO, 2007).

Para Sánchez, las personas y las sociedades, el acceso al agua limpia y saneamiento constituyen un fundamento del progreso (2013) que se manifiesta en:

Reducción de la mortalidad infantil y los gastos en salud. Alrededor de 1.6 millones de niños menores de 5 años mueren al año por causas directas vinculadas a la ausencia de agua y saneamiento, de las cuales más de 1 millón son causadas por la disentería bacilar o la diarrea hemorrágica. Pero además de las muertes se producen enfermedades, por ejemplo: 160 millones de personas están infectadas por la esquistosomiasis, que causa decenas de miles de defunciones anuales; 500 millones de personas corren el riesgo de contraer tracoma, por cuya causa 146 millones están amenazadas de ceguera y 6 millones padecen deterioro visual. Las helmintiasis intestinales (ascariasis, tricuriasis y anquilostomiasis) están afectando al mundo en desarrollo por falta de agua y la práctica adecuada de saneamiento e higiene; 133 millones de personas sufren parasitosis intestinales causadas por helmintos; además de lo ya mencionado, cada año hay aproximadamente 1.5 millones de casos de hepatitis A-clínica. Se considera que cada año, la ausencia de los niños a las escuelas alrededor del mundo suma 272 millones de días hábiles perdidos, debido a problemas médicos como la diarrea (WHO y UNICEF, 2014).

Acabar con las desigualdades de género. La división de género en el hogar, sigue designando responsabilidades a las mujeres que no son compartidas con los hombres. Alrededor de tres cuartas partes de los hogares en África subsahariana obtienen agua de

una fuente lejana a sus casas (UNICEF/OMS, 2012), de los cuales, entre el 50% y el 85% de las veces las responsables de esta tarea son las mujeres (OIT/PNUD WGF).

Se han vinculado los problemas del agua con un problema de escasez, cuando generalmente nace de la desigualdad, de la pobreza, del mal uso del poder, más allá de la disponibilidad física. Es necesario, por lo tanto, considerar las vinculaciones del agua con la pobreza, y el desarrollo.

El reconocimiento, y sobre todo el cumplimiento del derecho humano al agua es un fin en sí mismo y un fundamento para el cumplimiento de otros derechos esenciales. Los derechos humanos no son optativos, ni exclusivamente una disposición legal que pueden cambiarse arbitrariamente, son obligaciones exigibles que reflejan valores fundamentales universales y que conllevan responsabilidades por parte de los gobiernos y los ciudadanos. El abastecimiento de agua y el uso que hacemos de los recursos hídricos son factores determinantes para un desarrollo sostenible. El principal objetivo del derecho al agua es garantizar el respeto a uno de los derechos humanos fundamentales mediante la accesibilidad al consumo de este recurso.

El derecho al agua en la normativa internacional de derechos humanos

Aunque el derecho al agua no está reconocido expresamente como un derecho humano independiente en los tratados internacionales, las normas internacionales de derechos humanos comprenden obligaciones específicas en relación con el acceso al agua potable. Esas obligaciones exigen a los Estados que garanticen a todas las personas el acceso a una cantidad suficiente de agua potable para el uso personal y doméstico, que comprende el consumo, el saneamiento, el lavado de ropa, la preparación de alimentos y la higiene personal y doméstica. También se les exige que aseguren progresivamente el acceso a servicios de saneamiento adecuados, como elemento fundamental de la dignidad humana y la vida privada, pero también que protejan la calidad de los suministros y los recursos de agua potable.

Varios planes de acción de diversos organismos del mundo han mencionado el agua potable y el saneamiento como un derecho humano. En el Programa de Acción de la Conferencia Internacional sobre la Población y el Desarrollo de 1994, los Estados afirmaron que toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado para sí y su familia, lo que incluye alimentación, vestido, vivienda, agua y saneamiento adecuados. En el Programa de Hábitat, aprobado por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre los Asentamientos Humanos (Hábitat II) en 1996, el agua y el saneamiento también se consideraron parte del derecho a un nivel de vida adecuado. Para afrontar la crisis, la comunidad internacional ha tenido que cobrar conciencia de que el acceso al agua potable y al saneamiento debe encuadrarse en el marco de los derechos humanos.

En la Cumbre de Milenio de Naciones Unidas de septiembre de 2000 se aprobó la Declaración del Milenio, ésta se compone de ocho objetivos orientados a extender los beneficios de la globalización a los ciudadanos más pobres del mundo. Específicamente, el séptimo de ellos persigue reducir a la mitad el porcentaje de la población mundial sin acceso seguro al agua potable. Más tarde, durante la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible de Johannesburgo en 2002, se amplió el alcance de esta meta incluyendo también el acceso a un saneamiento básico, reconociendo que los recursos hídricos son un factor fundamental para la conquista del resto de los Objetivos de Desarrollo del Milenio. Esta referencia al saneamiento está actualmente integrada en la meta 10 (Plan de Aplicación de Johannesburgo, 2002). Se han logrado progresos significativos en el abastecimiento a la población de agua potable y saneamiento básico. Sin embargo, resulta necesario un mayor esfuerzo para ampliar estos servicios a la población todavía excluida.

El derecho internacional del agua incluye la satisfacción de necesidades tales como alimentación, salud, desarrollo en un medio ambiente sano, servicios básicos, calidad de vida, vivienda, entre otras. Los Estados deben tomar en cuenta que éste es un recurso básico y que forma parte del patrimonio común, lo que implica que a pesar de las diferencias entre las naciones y de las que existen al interior de las poblaciones, el acceso al agua debe ser para todas las personas. También les exige a las Naciones que aseguren progresivamente el acceso a servicios de saneamiento adecuados, como elemento

fundamental de la dignidad humana y la vida privada, pero también que protejan la calidad de los suministros y los recursos de agua potable. Considerando las partes involucradas, es posible asumir que el derecho al agua se compone por:

- El derecho de las personas al recurso.
- La responsabilidad de los poderes públicos.
- El servicio de acceso a todas las personas.
- El ámbito de aplicación de los Estados.

El Primer Congreso de las Naciones Unidas sobre Prevención del Delito y Tratamiento del Delincuente, celebrado en Ginebra en 1995 adoptó las Reglas Mínimas para el Tratamiento de los Reclusos. En este documento se encuentran algunos artículos relacionados con el agua, como parte del respeto a la dignidad de la persona, por ejemplo:

Art. 15. Se exigirá aseo personal de los reclusos y para tal efecto dispondrán de agua y de los artículos de aseo indispensables para su salud y limpieza.

Art. 16. Se facilitará a los reclusos medios para el cuidado del cabello y de la barba, a fin de que se presenten de un modo correcto y conserven el respeto de sí mismos; los hombres deberán poder afeitarse con regularidad.

Art. 20. 1) Todo recluso recibirá de la administración, a las horas acostumbradas, una alimentación de buena calidad, bien preparada y servida, cuyo valor nutritivo sea suficiente para el mantenimiento de su salud y de sus fuerzas. 2) Todo recluso deberá tener la posibilidad de proveerse de agua potable cuando la necesite.

La Resolución 1803 (XVII) de la Asamblea General de las Naciones Unidas, del 14 de diciembre de 1962, creó la Comisión de la Soberanía Permanente sobre los Recursos Naturales para que realizara un estudio completo de la situación en lo que respecta a la

soberanía permanente sobre recursos y riquezas naturales como elemento básico del derecho a la libre determinación, y formulara recomendaciones, si fuere el caso, encaminadas a reforzarlo. Resolvió además, que al estudiar a fondo la cuestión de la soberanía permanente de los pueblos y de las naciones sobre sus riquezas y recursos naturales, se tuvieran debidamente en cuenta los derechos y deberes de los Estados en virtud del derecho internacional y la importancia de fomentar la cooperación internacional en el desarrollo económico de los países en vías de desarrollo.

Teniendo presente lo dispuesto en la resolución 1515 (15 de diciembre de 1960) de esta misma asamblea, en la que se ha recomendado que se respete el derecho soberano de todo Estado a disponer de su riqueza y de sus recursos naturales, el concepto de la cantidad básica de agua requerida para satisfacer las necesidades humanas fundamentales se enunció por primera vez en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Agua, celebrada en Mar del Plata, Argentina en 1977. En su Plan de Acción se afirmó que todos los pueblos, cualquiera que sea su nivel de desarrollo o condiciones económicas y sociales, tienen derecho al acceso a agua potable en cantidad y calidad acordes con sus necesidades básicas.

En diciembre de 1979, se lleva a cabo en Nueva York la Convención sobre la eliminación de todas las formas de discriminación contra la mujer (CEDAW); la Convención hace explícitamente referencia en su contenido tanto al agua como al saneamiento. En el artículo 14(2)(h) de la CEDAW estipula que:

“Los Estados Parte adoptarán todas las medidas apropiadas para eliminar la discriminación contra la mujer en las zonas rurales a fin de asegurar, en condiciones de igualdad entre hombres y mujeres, su participación en el desarrollo rural y en sus beneficios, y en particular, le asegurarán el derecho a: ... (h) Gozar de condiciones de vida adecuadas, particularmente en las esferas de la vivienda, los servicios de saneamiento, la electricidad y el abastecimiento de agua, los transportes y las comunicaciones”.

La Convención sobre los Derechos del Niño, en Noviembre 1989 menciona explícitamente el agua, el saneamiento ambiental y la higiene en su artículo 24(2), que estipula que:

“Los Estados Parte asegurarán la plena aplicación de este derecho y, en particular, adoptarán las medidas apropiadas para: (...) c) Combatir las enfermedades y la malnutrición en el marco de la atención primaria de la salud mediante, entre otras cosas, la aplicación de la tecnología disponible y el suministro de alimentos nutritivos adecuados y agua potable salubre, teniendo en cuenta los peligros y riesgos de contaminación del medio ambiente; (...) e) Asegurar que todos los sectores de la sociedad, y en particular los padres y los niños, conozcan los principios básicos de la salud y la nutrición de los niños, las ventajas de la lactancia materna, la higiene y el saneamiento ambiental y las medidas de prevención de accidentes; tengan acceso a la educación pertinente y reciban apoyo en la aplicación de esos conocimientos”.

El Principio 4 de la Conferencia Internacional sobre Agua y Desarrollo Sostenible de Dublín, efectuada en enero 1992, establece que *“...es esencial reconocer ante todo el derecho fundamental de todo ser humano a tener acceso a un agua pura y al saneamiento por un precio asequible”.*

Posteriormente, el derecho al agua potable y saneamiento continúan siendo mencionados como un derecho humano por varios planes de acción. En 1994, en el Programa de Acción de la Conferencia Internacional sobre la Población y el Desarrollo, quedo establecido que *“toda persona tiene derecho a un nivel de vida adecuado, lo cual incluye alimentación, vestido, vivienda, agua y saneamiento adecuados”.* En el Programa de Hábitat, aprobado por la Conferencia de las Naciones Unidas sobre los Asentamientos Humanos (Hábitat II) en 1996, el agua y el saneamiento también se consideraron parte del derecho a un nivel de vida adecuado.

En noviembre de 2002, el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de las Naciones Unidas aprobó su Observación general N° 15 sobre el derecho al agua, en la que este derecho se definió como el derecho de todos *“a disponer de agua suficiente, salubre, aceptable, accesible y asequible para el uso personal y doméstico”*. Aunque en el Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales no se menciona expresamente del derecho al agua, el Comité subrayó que este derecho forma parte del derecho a un nivel de vida adecuado, al igual que los derechos a disponer de alimentación, de una vivienda y de vestido adecuados, también subrayó que el derecho al agua está indisolublemente asociado al derecho a la salud y a una vivienda y una alimentación adecuadas.

En 2006, la Subcomisión de Promoción y Protección de los Derechos Humanos, de las Naciones Unidas, aprobó las directrices para la realización del derecho al agua potable y al saneamiento. El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) también ha subrayado que el punto de partida, y el principio unificador de la acción pública, en relación con el agua y el saneamiento, es el reconocimiento de que el derecho al agua es un derecho humano básico.

El derecho al agua ha sido reconocido también en declaraciones regionales: el Consejo de Europa ha afirmado que toda persona tiene derecho a una cantidad suficiente de agua para satisfacer sus necesidades básicas; en 2007, los dirigentes de Asia y el Pacífico reconocieron que el derecho de las personas a disponer de agua potable y de servicios básicos de saneamiento es un derecho humano básico y un aspecto fundamental de la seguridad humana; en la Declaración de Abuja, aprobada en la Primera Cumbre América del Sur-África, en 2006, los Jefes de Estado y de Gobierno declararon que promoverían el derecho de sus ciudadanos al acceso al agua potable a la sanidad dentro de sus respectivas jurisdicciones. Aunque estas declaraciones no son jurídicamente vinculantes, reflejan el consenso y la declaración política de intenciones sobre la importancia de reconocer y hacer realidad el derecho al agua.

En marzo de 2008, mediante la Resolución 7/22, el Consejo de Derechos Humanos creó el mandato del *“Experto independiente sobre la cuestión de las obligaciones de derechos humanos relacionadas con el acceso al agua potable y el saneamiento”* para esclarecer el alcance y el contenido de esas obligaciones. En Abril de 2011, mediante la Resolución 16/2, el Consejo de Derechos Humanos decidió extender el mandato por un período de tres años.

El 28 de julio de 2010, a través de la Resolución 64/292, la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. La resolución exhorta a los Estados y organizaciones internacionales a proporcionar recursos financieros, a propiciar la capacitación y la transferencia de tecnología para ayudar a los países, en particular a los países en vías de desarrollo, a proporcionar un suministro de agua potable y saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos. Así se manifiesta en su Artículo 1, cuando señala que *“Reconoce que el derecho al agua potable y el saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos”*.

En mayo de 2011, la Organización Mundial de la Salud (OMS), mediante su Resolución 64/24, hacía un llamamiento a los Estados Miembros *“para garantizar que las estrategias de salud nacionales contribuyen al logro de los Objetivos de Desarrollo del Milenio en materia de agua y saneamiento al tiempo que apoyan la progresiva realización del derecho humano al agua y saneamiento”*.

Las obligaciones específicas relacionadas con el acceso al agua potable y al saneamiento han sido reconocidas también, de manera cada vez mayor, en los principales tratados de derechos humanos, fundamentalmente como parte del derecho a un nivel de vida adecuado y del derecho a la salud. A nivel regional, entre otras, en el Protocolo Adicional a la Convención Americana sobre Derechos Humanos en materia de derechos

económicos, sociales y culturales (1988) se subraya que *todos tienen derecho a vivir en un entorno sano y a tener acceso a los servicios públicos básicos (Art. 11.1)*.

A nivel interno, numerosas constituciones contienen referencias explícitas al derecho al agua, entre ellas las de Ecuador, Bolivia, la República Democrática del Congo, Sudáfrica, Uganda y Uruguay. El derecho a servicios de saneamiento también se consagra en diversas constituciones y legislaciones nacionales, como las de Argelia, Bolivia, las Maldivas, Sri Lanka, Sudáfrica y Uruguay. Otras constituciones aluden a la responsabilidad general del Estado de asegurar el acceso al agua potable y saneamiento como ejemplo, las de Camboya, Colombia, Eritrea, Etiopía, Filipinas, Gambia, Irán, México, Nigeria, Panamá, Portugal y Zambia.

Aspectos fundamentales del derecho al agua

Las consideraciones biológicas sobre el agua son diferentes de su cualificación jurídica. No puede hablarse de un derecho humano al agua, sin determinar el contenido del mismo; sin delimitar sus elementos imprescindibles. Siguiendo lo señalado por las Naciones Unidas, se puede determinar:

1. El derecho al agua entraña libertades. Estas libertades están dadas por la protección contra cortes arbitrarios e ilegales; la prohibición de la contaminación ilegal de los recursos hídricos; la no discriminación en el acceso al agua potable y el saneamiento, en particular por razón de la clasificación de la vivienda o de la tierra; la no injerencia en el acceso a los suministros de agua existentes, especialmente las fuentes de agua tradicionales; y la protección contra las amenazas a la seguridad personal al acceder a agua o servicios de saneamiento fuera del hogar.
2. El suministro de agua para cada persona debe ser continuado y suficiente. Para cubrir los usos personales y domésticos, que comprenden el consumo, el lavado

de ropa, la preparación de alimentos y la higiene personal y doméstica. Otros usos domésticos del agua, como el agua para las piscinas o la jardinería, no están incluidos en el derecho al agua. El derecho al agua abarca, por lo tanto, lo necesario para mantener la vida y la salud y satisfacer las necesidades básicas, no confiere a las personas el derecho a una cantidad ilimitada de agua.

Según la OMS, se requieren entre 50 y 100 litros de agua por persona al día para cubrir la mayoría de las necesidades básicas, y evitar en medida de lo posible los problemas de salud. El acceso de 20 a 25 litros por persona al día representa el mínimo, una cantidad que suscita preocupaciones sanitarias, pues no basta para cubrir las necesidades básicas de higiene y consumo. Estas cantidades son indicativas, dependen del contexto particular y pueden diferir de un grupo a otro en función del estado de salud, el trabajo, las condiciones climáticas u otros factores. Las madres lactantes, las mujeres embarazadas y las personas que viven con VIH/SIDA necesitarán entre 50 y 100 litros de agua al día.

3. El agua para el uso personal y doméstico debe ser salubre y aceptable. De conformidad con la Observación General No. 15, el agua debe estar exenta de microbios y parásitos, así como de sustancias químicas y radiológicas, que puedan constituir una amenaza para la salud de las personas. Además, debe tener un color, un olor y un sabor aceptables, a fin de que las personas no recurran a otras fuentes que puedan parecer más atractivas pero estén contaminadas. Estos requisitos se aplican a todas las fuentes de abastecimiento, como el agua corriente, el agua de cisternas, el agua comprada a un proveedor y los pozos protegidos. La salubridad del agua potable se define normalmente mediante normas nacionales y/o locales de calidad de agua potable.

La falta de sistemas de saneamiento adecuados en muchas partes del mundo, ha dado lugar a la contaminación generalizada de las fuentes de agua de las que depende la supervivencia de las comunidades. En su Observación General No. 15, el Comité subrayó que garantizar el acceso a servicios de saneamiento adecuados

es uno de los principales mecanismos para proteger la calidad de las reservas y los recursos de agua potable. Los servicios de abastecimiento de agua y de saneamiento deben ser físicamente accesibles y estar al alcance de todos los sectores de la población, teniendo en cuenta las necesidades de determinados grupos, como las personas con discapacidad, las mujeres, los niños y los ancianos.

4. Accesibilidad. Aunque el derecho al agua no significa que todos deban tener acceso a este recurso y a los servicios de saneamiento dentro del hogar, sí presupone que éstos se encuentren en las cercanías o a una distancia razonable de la vivienda. También debería haber agua y servicios de saneamiento en las escuelas y los hospitales, los lugares de trabajo, los centros de detención y los campamentos de refugiados y de personas internamente desplazadas.

La OMS establece que para tener un acceso básico a 20 litros de agua por día la fuente debe estar a no más de 1,000 m del hogar y el tiempo necesario para ir a buscar agua no debe exceder de 30 minutos. Para poder hablar de una disponibilidad óptima de agua corriente en una vivienda, es necesario que cada persona pueda disponer de 100 litros al día para su uso personal.

5. Los servicios de agua deben ser asequibles para todos. Ningún individuo o grupo tendría que verse privado del acceso a agua potable por no poder pagar. Por consiguiente, los costos directos e indirectos del agua y el saneamiento no deberían privar a nadie del acceso a estos servicios, tampoco comprometer la capacidad de disfrutar de otros derechos humanos, como el derecho a la alimentación, a la educación, a una vivienda adecuada o a la salud. El requisito de asequibilidad pone en relieve que la recuperación de los costos no debe erigirse en un obstáculo al acceso al agua potable y el saneamiento, especialmente para los pobres. Por ejemplo, el PNUD propone como punto de referencia un umbral del 3% del ingreso familiar. En general, los hogares más pobres no deberían cargar con una parte desproporcionadamente alta de los gastos en agua y saneamiento.

Es evidente que el reconocimiento en las constituciones nacionales de algunos países, y en los más relevantes organismos internacionales, supone un notable avance en la puesta en práctica del derecho humano al agua, y en la eliminación de las injusticias a las cuales millones de personas se ven sometidas diariamente ante la falta de acceso y saneamiento. Ahora bien, este reconocimiento como derecho humano deviene inoperante, si no va acompañado del compromiso de los poderes públicos de implementarlo correctamente adoptando medidas políticas y económicas.

Tribunales de distintos ordenamientos jurídicos han emitido también fallos en situaciones relacionadas con el disfrute del derecho al agua, respecto de cuestiones tales como la contaminación de los recursos hídricos, los cortes arbitrarios e ilegales y la falta de acceso a servicios de saneamiento.

Las ideas falsas más comunes con respecto al derecho al agua

El derecho al agua significa que los servicios de abastecimiento deben ser asequibles para todos y que nadie debe verse privado de ellos por no tener la capacidad de pagar, a pesar de que el marco de los derechos humanos no establece el derecho a un suministro gratuito del recurso. En determinadas circunstancias, el acceso al agua potable y servicios de saneamiento tendría que ser subsidiado, en caso de que la persona o familia no tuviera los recursos económicos necesarios. Es una obligación del Estado velar para que se satisfagan por lo menos los niveles esenciales mínimos de este derecho.

En la Observación general N° 15 se destaca que los Estados deben adoptar las medidas necesarias que pueden incluir en particular, la aplicación de políticas de precios adecuados, por ejemplo el suministro de agua a título gratuito o a bajo costo. Esto para asegurar que una mayor cantidad de personas disponga de este recurso.

El agua es indispensable para la vida, pero también es fundamental para la seguridad alimentaria, la generación de ingresos y la protección del medio ambiente. El derecho a

ella comprende sólo los usos personales y domésticos: el consumo, el lavado de ropa, la preparación de alimentos y la higiene personal y doméstica. No abarca el agua necesaria para la agricultura, el pastoreo, o para el mantenimiento de los sistemas ecológicos.

El acceso al agua para la agricultura, en particular por pequeños propietarios, forma parte del derecho a una alimentación adecuada, establecido en el artículo 11 del Pacto. Sin embargo, en la Observación general N° 15 se declara que debe darse prioridad "*...a los recursos hídricos necesarios para evitar el hambre y las enfermedades, así como para cumplir las obligaciones fundamentales que entraña cada uno de los derechos del Pacto*". Considerando la interdependencia e indivisibilidad de los derechos humanos, puede decirse que el derecho al agua asigna prioridad a su uso para la agricultura y el pastoreo cuando ello sea necesario para prevenir el hambre.

Ahora bien, el derecho al agua tiene repercusiones en la ordenación de los recursos, porque exige que se dé prioridad a su asignación para el uso personal y doméstico de todas las personas. Estos usos representan una fracción mínima de la utilización total de agua, por lo general menos de un 5%, mientras que el riego sigue siendo el sector de mayor consumo y absorbe actualmente más del 80% en los países en desarrollo, según el PNUD.

El nexo entre el derecho al agua y otros derechos humanos

El acceso al agua potable es una condición previa fundamental para el goce de otros derechos humanos (educación, la vivienda, la salud, la vida, el trabajo y la protección contra tratos o penas crueles, inhumanas o degradantes). También es un elemento crucial para lograr la equidad de género y erradicar la discriminación.

Un ejemplo que ilustra lo anterior, en lo que respecta a la educación, cuando las instituciones no cuentan con servicios higiénicos separados para las niñas, algunos padres no permiten a sus hijas asistir a la escuela una vez que han comenzado a menstruar.

La falta de acceso al agua potable y servicios de saneamiento también tiene graves repercusiones en el derecho a la salud. Según el PNUD, cada año mueren alrededor de 1.8 millones de niños por diarrea y otras enfermedades provocadas por el agua insalubre y las condiciones deficientes de saneamiento, cifra que es superior a la de las víctimas causadas por conflictos armados. El acarreo de agua desde fuentes distantes también tiene graves consecuencias para la salud, especialmente de las mujeres y los niños. Además del gran peso que deben transportar, se ven expuestos a enfermedades que se contraen por contacto con el agua contaminada, como la esquistosomiasis. El hecho de que la mayor parte del acarreo de agua recaiga en este sector de la población tiene consecuencias para la educación y otras actividades productivas.

Cuando no se dispone de agua y servicios de saneamiento dentro de la vivienda, la privacidad y la seguridad física se convierten en un problema. Al no haber servicios adecuados de saneamiento en el hogar, las mujeres y los niños suelen tener que acudir a letrinas comunes o salir al aire libre para defecar; esta situación los expone al acoso, los ataques, la violencia o las agresiones sexuales.

El acceso al agua potable y servicios de saneamiento es indispensable para que las personas privadas de libertad puedan recibir un trato digno, considerando que no disponen de una vivienda adecuada, educación, trabajo y seguridad social.

La inseguridad de la tenencia de la tierra como elemento fundamental del derecho a una vivienda adecuada, es con frecuencia el motivo que aducen las autoridades para denegar a los habitantes de asentamientos precarios, el acceso al agua potable y servicios de saneamiento. El corte del abastecimiento ha sido utilizado también por propietarios y autoridades para obligar a las personas a abandonar sus viviendas. Si no se respetan los derechos a la libertad de expresión, reunión o asociación, las oportunidades de las

personas y las comunidades de abogar por una mejora de sus condiciones de vida se reducen considerablemente.

Enfoque del abastecimiento de agua basado en los derechos

El enfoque del suministro de agua potable y de servicios de saneamiento desde la perspectiva de los derechos humanos, puede servir para impulsar la movilización de las personas, en particular de los pobres y los marginados, informarles sobre los derechos que les asisten por ley y empoderarlos para que los ejerzan. El enfoque basado en los derechos humanos aporta un nuevo paradigma al sector de los recursos hídricos: el abastecimiento de agua potable deja de ser una obra de beneficencia, para convertirse en un derecho legal.

Un marco de derechos humanos no resuelve automáticamente las complicaciones del financiamiento, prestación o reglamentación del servicio, pero aporta normas internacionales que pueden orientar las decisiones políticas y económicas sobre la asignación de los recursos hídricos. Permite que las necesidades de las personas sean atendidas en la adopción de decisiones relacionadas con el agua y el saneamiento, y se fortalezca la rendición de cuentas sobre la prestación de esos servicios.

Contrario a lo anterior, los miembros de los grupos marginados suelen quedar excluidos del proceso de adopción de estas decisiones, por lo que rara vez se da prioridad a sus necesidades. La participación de la comunidad en la planificación y elaboración de los programas de abastecimiento de agua y de servicios de saneamiento es esencial también para asegurar que los servicios sean pertinentes y adecuados y, por consiguiente, sostenibles a largo plazo.

La importancia que se atribuye a la rendición de cuentas, pone de relieve la obligación del Estado, como garante de los derechos, de asegurar el acceso de los titulares de derechos al agua potable y el saneamiento. En la práctica, la rendición de cuentas debe ir

acompañada por leyes, políticas, instituciones, procedimientos administrativos y mecanismos de reparación para promover y proteger el acceso al agua potable y el saneamiento.

Aplicación del principio de no discriminación al derecho al agua

La discriminación en el acceso al agua potable y el saneamiento se relaciona con la marginación de determinados grupos de población, suele ser una de las causas básicas de las desigualdades estructurales en la sociedad y puede encontrar sustento en leyes, políticas o medidas erróneas, en la elaboración de políticas de carácter excluyente, en estrategias arbitrarias de ordenación de los recursos hídricos, en la denegación de la seguridad de la tenencia, en una limitada participación en la adopción de decisiones o en la falta de protección contra las prácticas discriminatorias de agentes privados. La no discriminación y la igualdad son principios fundamentales de los derechos humanos y componentes críticos del derecho al agua.

Los efectos son aún más graves cuando la discriminación es doble o múltiple, por motivos de sexo, raza, origen nacional o discapacidad. El PNUD enfatizó la importancia de combatir esa discriminación intersectorial en su Observación General N° 16, relativa a la igualdad de derechos del hombre y la mujer al disfrutar de los derechos económicos, sociales y culturales. A pesar de esto, algunos grupos de personas tienen mayor dificultad para ejercer su derecho al agua. A fin de proteger eficazmente este derecho, es necesario prestar atención a la situación concreta en la que se encuentran. Es deber del gobierno adoptar medidas al respecto. Podrían adaptar sus políticas relativas al agua y el saneamiento a quienes estén más necesitados de asistencia, en lugar de atender primordialmente a los grupos mayoritarios. Los Estados deberán asignar recursos financieros y humanos a grupos que históricamente han sufrido discriminación, para asegurarse de que puedan disfrutar de sus derechos equitativamente.

Las personas pobres de las zonas urbanas y rurales. La mayor parte de las personas que no tienen acceso a agua potable y saneamiento son gente pobre de zonas urbanas o rurales. No sólo tienen menos probabilidades de disponer de ellos, también tienen menos capacidad para hacer frente a los efectos de esta privación. Representan el 42% de la población urbana en los países en desarrollo. Las autoridades, nacionales o locales, suelen ser reacias a conectar esos asentamientos a las redes de agua y saneamiento debido a sus condiciones. Los proveedores de servicios también aducen una serie de razones para no abastecer a estos lugares, entre otras, que los habitantes no están en calidad de pagar y asegurar la recuperación de los costos, no tienen los documentos necesarios para demostrar su derecho a recibir los servicios o que existe el riesgo de desalojo. Como consecuencia de ello, los habitantes de estos asentamientos tienen que recoger agua de fuentes no protegidas, como pozos o canales de riego contaminados, o comprarla a un precio más alto que el que pagan las personas conectadas al sistema de agua corriente. Cuando la población mencionada no dispone de una fuente segura de agua potable, su abastecimiento se suele reducir en los tiempos de escasez para mantener el suministro a las zonas más ricas.

Las mujeres. La falta de acceso a agua potable y servicios de saneamiento afecta a este sector de modo particular. Cuando su suministro es escaso, el acarreo de agua corre a cargo principalmente de las mujeres y las niñas. Según el PNUD, esa tarea explica también en parte la gran disparidad en la asistencia a la escuela de niños y niñas en muchos países. No es raro que las mujeres pasen hasta cuatro horas diarias caminando, haciendo fila y acarreando agua, en lugar de dedicar ese tiempo a actividades productivas, o a las labores domésticas y a cuidar a los niños. En muchos casos, el agua que recogen está sucia y procede de fuentes no protegidas. La salud de las mujeres puede resentirse profundamente por la pesada carga del acarreo de agua, y también por las enfermedades que se contraen por contacto con el agua.

Con gran frecuencia, las mujeres están excluidas de la aplicación de decisiones relativas al agua y el saneamiento. Como consecuencia, sus necesidades y circunstancias

específicas no se toman en consideración al elaborar los programas de suministro y saneamiento o al ampliar estos servicios.

Principales teorías en materia de derechos del agua

Soberanía territorial absoluta. Históricamente, los Estados han ejercido la soberanía absoluta sobre su territorio, incluido el uso de las aguas de los ríos y otros recursos naturales localizados en él, independientemente de que pueda llegar a afectar o no a uno o más países vecinos. Como consecuencia, no tiene derecho a demandar a quien permita la continuidad del flujo de agua de un río que atraviesa su territorio. El agua no es considerada como un recurso universal, sino nacional, que debe ser defendido a toda costa.

Este principio de soberanía territorial absoluta es conocido como Doctrina Harmon, aplicada en 1895 en la disputa entre México y EUA sobre la contaminación del Río Bravo y, a través de la cual, el país donde se origina el flujo de agua puede libremente utilizarla o disponer de ella dentro de su frontera, sin considerar los efectos que tendría en los otros países por donde fluye el río. También es defendida por Turquía, en lo que se refiere al uso de las aguas de los ríos Tigris y Éufrates y por Egipto, en lo que corresponde al Nilo. Sin embargo, esta teoría, apoyada por los países donde nace el agua, es considerada como un anacronismo y, por su visión limitante, impide la reconciliación de divergencias entre quienes comparten recursos naturales.

Apropiación previa. Una distinta pero similar teoría restrictiva en materia del agua es el principio de apropiación previa, la cual favorece al país que primeramente usa el agua, aplicándose el principio *primero en tiempo, primero en derecho*. Esta teoría también ha recibido poco apoyo internacional.

Integridad territorial absoluta. En contraste con teorías anteriores, se encuentra un principio que dicta que los países por los que cruza un río tienen derecho a un flujo

permanente de agua, por lo que nadie podrá llevar a cabo acciones que llegaran a afectar el flujo de un río compartido, y cada nación tiene el derecho de demandar la continuidad natural del agua que proviene de otra. No se podrá poner restricciones a ese flujo natural que cruza su territorio. Esta teoría ha recibido poco apoyo entre la comunidad jurista internacional por considerarse inequitativa, puesto que el gobierno río arriba está obligado a observar ciertas normas, sin que aquellos que se encuentren río abajo adopten obligaciones similares. Únicamente ha sido demandada cuando se vuelve crítico el flujo de agua río abajo, por quienes beneficia esta teoría.

Estas tres teorías no brindan una solución a las disputas en materia de aguas internacionales, debido a que se basan en una concepción individualista y anacrónica del Derecho Internacional, en donde los intereses personales y egoístas predominan, y no brindan soluciones a los intereses en conflicto sobre el uso y reparto de un caudal de agua que comparten dos o varios países.

Soberanía territorial restrictiva. En adición a las teorías jurídicas que se han desarrollado como una respuesta al manejo de agua compartida por dos o más Estados, existe el principio en Derecho Internacional de *sic utere tuo it alienum non laedas* (usarlo hasta tanto no dañes a otros), y que se refleja en la teoría de la soberanía territorial restrictiva e integridad territorial restrictiva, que impone límites al principio de soberanía territorial absoluta e integridad territorial absoluta.

Bajo este principio, un gobierno es libre de usar su agua territorial, siempre y cuando no perjudique los derechos y usos de los otros países con los que se comparte el flujo. Por su habilidad para equilibrar los intereses, esta teoría ha sido ampliamente favorecida en el intento de codificar el derecho internacional del agua, en las Reglas de Helsinki.

Comunidad de intereses. Recientemente ha surgido este concepto, que contempla al río como una unidad hidrológica que debe ser manejada de manera integral, sin tomar en cuenta las fronteras políticas; lo que es un paso adelante, en la protección de los recursos naturales y en la armonía que debe prevalecer en las relaciones interestatales. La

comunidad de intereses establece el reparto equitativo del agua basado en la buena fe y en las relaciones de armonía que deben existir entre las naciones. Se considera al agua como un regalo de la naturaleza para beneficio del género humano y no como una propiedad que prive del derecho de su uso a otros. Así, se ha logrado llegar a establecer un cuerpo de normas sobre el uso del agua que comparten una serie de países.

1.5 Estado del arte de la gestión integral del agua en el ámbito del manejo de información geográfica.

Los desafíos ambientales y sociales han convertido a la gestión de los recursos hídricos en un importante tema académico y de investigación. El cambio climático durante las últimas décadas se ha manifestado por un lado en aumento de temperatura, disminución de lluvias, desertificación, etc., y por otro, en tormentas, inundaciones, deslizamientos de tierra y erosión, las cuales amenazan vidas humanas e infraestructuras.

Este régimen ambiental en constante cambio expone la necesidad de realizar investigación científica en disciplinas relevantes como la hidrología con el objetivo de desarrollar una metodología más eficiente, una gestión óptima de las bases de datos y el modelado como la comprensión y pronóstico de un evento o fenómeno. En este sentido, la evolución tecnológica de las últimas décadas ha ofrecido nuevas oportunidades en el modelado hidrológico. Actualmente busca optimizar los modelos existentes, -evaluarlos con métodos estadísticos, análisis de sensibilidad, datos de campo, etc.-, combinarlos y compararlos y lo más importante, diseñar otros más, basados en el desarrollo de las tecnologías, técnicas y ciencias.

A la vanguardia de estas nuevas tecnologías se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Teledetección (RS), las cuales han encontrado una aplicación directa en el análisis y modelización de fenómenos naturales y la investigación de disciplinas clave, como la hidrología. El término SIG suele aplicarse a sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales que constituyen la herramienta informática más adecuada y extendida para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales (Alonso, 2005). Desde su aparición, en la década de los sesenta, los SIG han experimentado una evolución considerable que ha aportado nuevos enfoques para el manejo de información geoespacial con un apoyo informático. Los trabajos desarrollados por John K. Wright en la Sociedad Geográfica Americana, en especial la publicación de su obra *Elements of Cartography* en 1953, son particularmente importantes.

El uso de los SIG facilita el estudio de análisis de casos de interés sobre el territorio. Importantes casos de aplicación son expuestas por Batty (1993) en el desarrollo de procesos para la generación de una serie de modelos. Una parte esencial en cada uno de los análisis espaciales es el planteamiento de los objetivos que permitan responder a situaciones particulares plenamente identificadas, lo cual permite realizar el análisis sobre los modelos sustentados en el manejo de grandes cantidades de información y las variables que intervienen en el territorio, de tal manera que se genera un sistema tipo bucle, de cuyo análisis, retroalimentación y depuración se define una conclusión óptima.

En el análisis de cualquier escenario espacial, es necesario revisar sus diferentes componentes, así como las características propias de las variables que integran cada uno de ellos. Los SIG, la teledetección y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), están tomando un rol preponderante en el manejo de los recursos hídricos, al conjugar la dimensión espacial y temática en la representación precisa de los componentes territoriales (Bastiaanssen et al., 2003). Aplicando estas técnicas es posible obtener información precisa para conocer la configuración de un escenario territorial basados en los atributos de las múltiples variables que conforman la información. En este contexto, la determinación de sectores homogéneos de intervención mediante geoprocésamiento, facilita el análisis conjunto e integrado de variables territoriales factibles de ser expresadas espacialmente, lo cual constituye el punto de partida necesario para establecer una tipología de explotaciones que oriente las líneas de acción en un nuevo escenario con mayor y mejor disponibilidad del recurso agua (Bastiaanssen et al., 2003). Además, los SIG ofrecen la posibilidad de realizar consultas de análisis espacial para la toma de decisiones efectivas en torno a uno o varios temas de estudio particulares.

El análisis hidrológico basado en SIG tiene una amplia gama de aplicaciones en eventos naturales reales que demandan investigación, planificación y gestión óptima. Los textos científicos que analizan y aplican los SIG coinciden en aprovechar sus potencialidades en beneficio de los procesos de planificación y muchos otros. La necesidad de enfoques interdisciplinarios en el modelado de procesos y fenómenos naturales, está ganando cada vez más terreno, por ejemplo, el modelado de la escorrentía en una cuenca a través de

SIG puede implementarse mediante una combinación de datos de satélite, mediciones in situ, datos de series temporales, etc., proporcionando una visión global del fenómeno en estudio, por ejemplo, características de la red hidrográfica y del terreno, combinando varias disciplinas, como hidrología, geología, geomorfología e hidrometeorología. Además, el modelado de procesos naturales basado en SIG requiere un conocimiento mínimo de la naturaleza y limitaciones de los datos y el procesamiento de los algoritmos usados por el software no solo para la implementación de la metodología, sino también para detectar errores de modelado y validar el análisis.

La gestión integrada de los recursos hídricos, esencialmente se basa en reconocer que los diferentes usos del agua no son aislados entre sí. Esto lo podemos observar por ejemplo, en la afectación que sufren los campos de cultivo por la contaminación de sus fuentes; por otra parte, los flujos de agua contaminados por el uso agrícola representan menor disponibilidad de agua. Existen numerosos ejemplos como al anterior que han evidenciado alrededor del mundo la necesidad de implementar la gestión integral de los recursos hídricos, manteniendo un enfoque hacia la puesta en práctica de estrategias apoyadas en la oferta que permitan aumentar la disponibilidad del recurso. A su vez, la gestión de los mismos pretende influir en el manejo de los mismos, basado en la oferta y la demanda de un recurso limitado (Lord & Israel, 1996) para establecer objetivos, políticas y estrategias de desarrollo que impliquen el uso del agua como fuente esencial de éste; implementar procedimientos de toma de decisiones y ejecución de éstas; monitorear, evaluar y exigir el cumplimiento de los acuerdos; promover la participación en todas las etapas y áreas relacionadas con el uso de los recursos hídricos (RRHH); mejorar la infraestructura; controlar la rentabilidad social y privada de las actividades; y, finalmente, a partir del monitoreo de los resultados, establecer puntos críticos y realizar los cambios que permitan el cumplimiento de los objetivos planteados (Lankford et al., 2007).

Dentro del proceso general de estudio de la ordenación territorial, en la revisión del estado del arte de la GIRH no se ha encontrado norma general de aplicación. Sin embargo, es oportuno comentar que la preocupación de los organismos locales

encargados de la gestión del recurso en las naciones se encuentra expresado en la producción de material bibliográfico que pretende ofrecer un eje rector en la ejecución de la GIRH al publicar una bibliografía que analiza y desarrolla metodologías enfocadas a la utilidad práctica de la relación entre los SIG en función de la capacidad de modelización y el análisis espacial en la búsqueda de soluciones específicas a situaciones particulares relativas al proceso de planificación territorial y de mejorar la conciencia ambiental. Así, después de la obtención de datos, incluyendo usos del suelo, acuíferos, geología, edafología, aguas superficiales, recursos bióticos e infraestructuras se presentan opciones que integran estas variables espaciales y factores de riesgo (estrés hídrico, desertificación, contaminación, posibilidades de incendio), que inciden para los diferentes análisis necesarios para la prevención, el seguimiento y la administración de los elementos que inciden directamente en proceso de una adecuada GIRH. Por otra parte, es necesario destacar que el dinamismo que ofrece la GIRH exhibe también la necesidad de verificar y promocionar la información contenida en las bases de datos que apoyan el desarrollo de estos sistemas, considerando que esta información sea del dominio público para constituir las en un componente que aumente la eficacia y confiabilidad de la aplicación de estas metodologías.

Rogers (2006) hace una revisión de la producción científica en la gestión del agua y en su trabajo sugiere que la ciencia, al estar al servicio de la sociedad, tiene un papel ambivalente de investigación y difusión. En este sentido, la búsqueda de resultados es el agente que vincula a la sociedad, los organismos gestores y la comunidad científica en un sistema ecológico-social (Redman et al., 2004). La literatura que aborda temas ambientales expone que la investigación en estos temas motivan la incursión en temas más complejos derivados del anterior (Lejano & Ingram, 2008). Considerando la importancia de la gestión integral de los recursos hídricos, diversos organismos internacionales promueven entre la comunidad interesada, el financiamiento de búsqueda e intercambio de información, especialmente en lo referente a estudios de evaluación de los ecosistemas; así como de la demanda, utilización y calidad del agua (García, 1998).

Derivado del interés expresado por el gobierno de México se encuentran publicaciones realizadas desde la comunidad científica y gubernamental respecto al tema de la GIRH que expresan la necesidad de que la población del país disponga adecuadamente del recurso. La mayoría de las publicaciones coinciden en expresar que el problema de la gestión del agua se encuentra en la debilidad de su marco institucional, la cual no ha permitido que la GIRH tenga los resultados esperados. A pesar de puesta en práctica del citado modelo de gestión, las inercias y prácticas del pasado aún existen, es decir, la centralización del poder y no la descentralización y alta intensidad de participación de los diversos actores como plantea el modelo (Domínguez, 2006; Nava y Sandoval, 2014). En este contexto se aprobó el dictamen de la Ley General de Aguas y es necesario que la política federal del agua se adapte a esta reforma. La organización del agua en México, según información obtenida de la Ley de Aguas Nacionales y del Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua (Honorable Cámara de Diputados, 2017), se basa en trece regiones hidrológicas que son administradas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) a través de los Organismos de Cuenca. Cuando la región abarca un territorio demasiado extenso, estos organismos se auxilian por direcciones locales. Estas organizaciones federales tienen facultades en todos los asuntos relacionados con el agua, desde agua potable y saneamiento, concesiones de agua a particulares y asignaciones de agua a poblaciones, agua para la agricultura, hasta los aspectos geológicos y de protección de inundaciones como las grandes presas.

El Consejo de Cuenca es la junta de varias organizaciones que reúnen a los grupos interesados para la elaboración de los planes a largo plazo, así como para diseñar estrategias de remediación de problemas como inundaciones, sequías, contaminación de aguas, entre otras. Se apoyan en los Comités de Cuenca, Comités de Aguas Subterráneas, entre otros y son un instrumento de participación ciudadana en la gestión federal del agua en México. Los Distritos de Riego son organizaciones que integran a los grandes agricultores que tienen alto consumo de agua en sus procesos productivos. Por su parte, las Unidades de Riego aglutinan a los pequeños agricultores que tienen bajo consumo de agua. Estos Distritos y Unidades de Riego pretenden aumentar la eficiencia en el uso de

agua. La CONAGUA colabora con el 50% del costo total de la rehabilitación de canales de riego y adquisición de tecnología para reducir el consumo de agua en la agricultura, ocasionalmente la Comisión Estatal del Agua (CEA) correspondiente aporta un monto adicional, por lo que la inversión es, en su mayoría, con presupuesto público.

El Agua Potable y Saneamiento es un asunto de competencia básicamente municipal y la principal contribución federal se da por medio de CONAGUA con aportaciones del 50% del costo total de infraestructura. En los Organismos Operadores Municipales (OOM) existe un Consejo Consultivo que integra a funcionarios de la CONAGUA y CEA, y representantes del sector académico, empresarial y social. Estos OOM son descentralizados de la administración municipal, es decir, gozan de autonomía jurídica y financiera, sin embargo, el nombramiento del director general depende del Presidente Municipal en turno y las finanzas dependen en gran medida de subsidios del presupuesto municipal ya que la mayoría de estos organismos están en crisis financiera debido a la predominancia de los intereses políticos sobre los intereses públicos en la toma de decisiones (Cáñez, 2011).

En lo que respecta a los estados, en cada uno de ellos existe una Comisión Estatal del Agua (CEA) que son los encargados de administrar los cuerpos de agua que no son competencia federal y prestar el servicio de agua potable en los municipios que no tienen la capacidad técnica y financiera. En este sentido, se observa un entramado organizacional disperso y plural en la organización del agua en México, sin embargo, la práctica real ha sido de centralización y estas organizaciones no han sido capaces de influir en las decisiones, principalmente en manos del poder ejecutivo, ya sea federal, estatal o municipal (Domínguez, 2010).

México adoptó y reconoce la Gestión Integrada de Recursos Hídricos como su modelo de gestión y para contar con un modelo efectivo, además de organizaciones gubernamentales capaces, requiere de una ciudadanía en pleno ejercicio de sus derechos y obligaciones y en el caso mexicano se está lejos de contar con esas capacidades ciudadanas (Torregrosa et.al, 2012). El 5 de marzo de 2015 la Cámara de Diputados aprobó el dictamen de la

nueva Ley General de Aguas, la cual expresa que la administración del agua en México requiere de la coordinación de los distintos órdenes de gobierno, así como del sector privado y social. En sus artículos 33 al 36, se contempla que los estados y municipios se coordinen para formar recursos humanos y profesionalizar el sector hídrico. La nueva Ley se basa en la estructura de la Ley de Aguas Nacionales y enuncia un nuevo objetivo que es asegurar el derecho humano al agua potable y saneamiento aplicando un nuevo instrumento: la co-gestión del agua por medio de las concesiones a particulares del servicio en los municipios y la creación de asociaciones público privadas para la infraestructura (Honorable Cámara de Diputados, 2016).

De acuerdo con Aguilar (2013), el eslabón que hace falta para la adecuada GIRH en el país, es la gobernanza corporativa pública. Sugiere que la alta dirección pública, incluyendo la gestión de las juntas directivas de grupos interesados, es un nicho que se ha descuidado por la nueva gestión pública y la política pública y que se constituye como una de sus limitaciones teóricas y prácticas.

Considerando lo anteriormente expuesto, se concluye que la política pública del agua en México enfrenta el desafío de adaptar la nueva Ley General de Aguas al modelo de GIRH; propiciar la alta gerencia e inclusión real de todos los actores involucrados; conseguir la participación ciudadana en las decisiones públicas, para lo cual se requieren líderes con nuevas capacidades y actitudes gerenciales; y dejar atrás las prácticas de centralización. Es indispensable aumentar la eficacia de los objetivos públicos y estar atentos para adaptar la política al núcleo duro del problema, ya que un mundo libre de restricciones sería completamente caótico e imprevisible (Majone, 1997).

Situación general en el estado de San Luis Potosí.

En el Estado de San Luis Potosí, como en el resto del país se han hecho notar grandes repercusiones generadas por la falta del recurso, debido a una multiplicidad de factores, por ejemplo: aspectos demográficos causados por el crecimiento de la población, el desarrollo industrial, la demanda de producción agrícola, la contaminación de acuíferos por desechos industriales, la sequía, el crecimiento de la construcción de viviendas, el desarrollo de infraestructura educativa, de salud, comercial y vías terrestres.

Esta situación enfatiza la necesidad de una gestión con visión de planeación, seguridad, la cual ha estado sujeta a las decisiones político-administrativas sin facultades previstas ni perspectivas planteadas. Hoy en día en el estado las repercusiones por el uso y manejo del agua son un serio problema.

Capítulo 2

ESTABLECIMIENTO DE UN ENFOQUE PARA EL MANEJO SUSTENTABLE DEL AGUA A TRAVÉS DE MODELADO DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL

2.1 Evaluación de la oportunidad

El uso de agua en la vida moderna depende de nuestra capacidad de igualar la oferta y la demanda de agua de calidad apropiada en condiciones de accesibilidad y asequibilidad. Nuestras ciudades, comunidades productoras, áreas recreativas e industrias, requieren agua y su sostenibilidad depende de los sistemas naturales o humanos y del suministro de agua. Actualmente se invierte mucho tiempo y esfuerzo en aprender sobre los patrones espaciales y temporales, así como las características de los procesos hidrológicos y la alteración provocada por las actividades humanas para anticipar, manejar y modificar el comportamiento del sistema para sostener estilos de vida modernos y prevenir escasez (sequías), excedentes (inundaciones) y el deterioro de los recursos (contaminación). Otras cuestiones relacionadas con el agua, en particular, con el suministro, la contaminación de fuentes y el deterioro de la calidad son asuntos de gran preocupación a nivel mundial.

El estudio del manejo sustentable del agua requiere de una gran cantidad de información. Considerando su naturaleza y uso posterior es posible ordenarla en tres clases: física, económica y espacial. Esta clasificación se extiende hasta el tipo de archivos que se generan con ella, es decir, bases de datos o planos de varios tipos, que tradicionalmente no guardaban relación entre sí. Hoy en día es un hecho cotidiano la vinculación de información social y ambiental con su componente espacial. Un adecuado Sistema de Información Geográfica (SIG) nos permite relacionar información geográfica con datos alfanuméricos e incluso actualizarlos por medio de una interfaz gráfica. Los SIG pueden aplicarse tanto a las diferentes fases del ciclo hidrológico como a los procesos

relacionados, al proponer alternativas en las que pueden facilitar una gestión de los recursos hídricos más eficaz y/o más eficiente; desarrollar métodos que aborden problemas específicos; capacitar a la próxima generación de científicos, ingenieros y gestores sobre recursos hídricos.

La investigación de los procesos físicos, biológicos, económicos y sociales en su influencia hacia las cuencas hidrográficas ha aportado conocimiento para mejorar la gestión del recurso, por ejemplo:

- Conocimiento de los vínculos entre sus componentes (ríos, humedales, aguas subterráneas, uso de la tierra, etc.).
- Comprensión de los procesos que operan en diferentes escalas espaciales y temporales.
- Disponibilidad de indicadores económicos de sus condiciones y métodos para evaluar el uso del suelo.
- Diseño de modelos de simulación.
- Comprensión del riesgo e incertidumbre en la toma de decisiones.

La evaluación y gestión de los recursos hídricos son actividades inherentemente geográficas. Los SIG ofrecen poderosas herramientas para la recolección, almacenamiento, administración y visualización de información relacionada con mapas, mientras que los modelos de simulación proporcionan a los encargados de la toma de decisiones herramientas interactivas para comprender el sistema físico y juzgar cómo las acciones de gestión podrían afectar ese sistema (National Research Council 1999).

El desarrollo de nuevos sensores satelitales, herramientas de captura de datos y nuevas formas de publicación de información ha ampliado la accesibilidad y reducido el costo de la obtención de datos hidrológicos. Muchos de estos cambios están relacionados con la World Wide Web (www) y el papel de los SIG en los desarrollos masivos, tales como bibliotecas digitales, data warehouses, minería de datos y redes, los que han ampliado enormemente la accesibilidad a los datos hidrológicos (Openshaw 1997, Newton et al

1999). Por mencionar un ejemplo, la Universidad de Arizona ha compilado una lista de enlaces a sitios de alojamiento de datos hidrológicos en la superficie terrestre. El SIG ha permitido a las agencias gubernamentales y las organizaciones privadas publicar información y apoyar diversas formas de búsqueda de datos espaciales relevantes. Estos tipos de desarrollo tienen un gran impacto más allá de la investigación y la gestión, ya que pueden influir, por ejemplo, en los valores de los bienes raíces.

El SIG ha influido en el desarrollo e implementación de modelos hidrológicos en varios niveles. Los ejemplos que siguen ilustran también cómo se ha utilizado el SIG para abordar el suministro de agua, la calidad del agua y los problemas de gestión de aguas pluviales. En primer lugar, los SIG han proporcionado nuevas oportunidades para desarrollar y ejecutar modelos de manera eficiente. Estos modelos tienen en cuenta y predicen los valores de los fenómenos estudiados en cualquier punto dentro de la cuenca (Vieux, 1991; Julien et al., 1995; Mitsova et al., 1996; Vieux et al., 1996; Mitsova y Mitsova 1998).

En segundo lugar, los SIG también han permitido a los usuarios probar modelos más tradicionales de forma eficiente e incluir condiciones espaciales dividiendo las cuencas enteras en subcuencas más pequeñas. Shamsi (1996) combinó un SIG de planificación con el modelo de escorrentía del Modelo de Estado de Penn (PSRM) y los utilizó para implementar un plan de manejo de aguas pluviales en una de esas aplicaciones. La gestión de las aguas pluviales tiene como objetivo prevenir o mitigar los impactos adversos relacionados con el transporte de tasas excesivas y volúmenes de escorrentía de aguas pluviales. Para evitar el desplazamiento de la ubicación y/o el aumento de la magnitud del problema aguas abajo, se requieren enfoques a lo largo de toda la cuenca. El SIG se utilizó para estimar los parámetros físicos del sitio requeridos por el modelo. Se usaron sistemas vectoriales y ráster dependiendo del tamaño del área de estudio y varios de los insumos se obtuvieron a partir de superposiciones de GIS y tablas de consulta. El PSRM es un modelo de simulación de un solo evento que incorpora técnicas de infiltración del Servicio de Conservación de Suelos (SCS), el método de onda cinemática para el flujo terrestre y el enrutamiento no lineal para el almacenamiento. El modelo se

calibró con datos de hidrogramas observados y se usó para simular hidrogramas de escorrentía para varias duraciones y frecuencias y para crear tablas de presentación de flujo máximo y velocidad de liberación de los hidrogramas simulados. La información resumida en estas tablas fue utilizada para crear un mapa de tasas de liberación de cuencas que cumplía con los requisitos de la Ley de Manejo de Aguas Pluviales de Pensilvania (1978) y proporcionaba una herramienta práctica para implementar planes de manejo de aguas pluviales.

La adopción de este enfoque en seis de las 356 cuencas hidrográficas designadas por Pensilvania indica que la integración de PSRM y SIG ofrece soluciones efectivas y técnicamente sólidas a los problemas de manejo de aguas pluviales en toda la cuenca de Pensilvania. Djokic y Maidment (1991) usaron ARC/INFO para simular el sistema de drenaje y evaluar si el sistema de drenaje existente en una porción de la ciudad de Asheville, Carolina del Norte, puede acomodar flujos de diseño de 10 y 25 años. Su enfoque utilizó el método racional para examinar las contribuciones del terreno superficial (es decir, el flujo terrestre), las estructuras hechas por el hombre (es decir, las tuberías y los canales) y las tomas de agua de lluvia.

En tercer lugar, los SIG se han utilizado para transformar lo que eran originalmente modelos de sitio en modelos espacialmente distribuidos. Por ejemplo, Carbone et al (1996) combinaron el SIG y las tecnologías de teledetección con el modelo de crecimiento fisiológico SOYGRO (Wilkerson et al., 1983) y los utilizaron para predecir la variabilidad espacial. Este modelo relaciona los principales procesos de crecimiento de la soya (fotosíntesis, respiración, síntesis de tejidos, translocación de proteínas, senescencia, etc.) a las condiciones ambientales. SOYGRO ha sido probado en una variedad de ambientes y ha demostrado ser confiable para estimar el rendimiento en condiciones bien manejadas (Curry et al 1990). Se utilizó ARC/INFO para organizar los datos meteorológicos, de suelos y de manejo de cultivos, y el modelo SOYGRO para 40 combinaciones de condiciones meteorológicas y de suelo durante un período de seis años (1986-91). Los resultados mostraron que la variabilidad espacial estaba relacionada con la disponibilidad de humedad del suelo. Esta propiedad del suelo es una función de la

capacidad de retención de agua disponible y el tiempo y la cantidad de precipitación, los cuales variaron espacialmente. Carbone et al (1996) concluyeron que el análisis de los patrones espaciales de rendimiento mejoró la producción e identificó las áreas vulnerables.

En cuarto lugar, se utiliza el SIG para variar los datos de entrada de los modelos y comparar los resultados con los datos de campo, esperando construir una base científica para las políticas y planes de gestión del agua. Inskeep et al., (2016), por ejemplo, compararon varios enfoques de modelado que podrían ser aplicables para clasificar los mapas de suelos de acuerdo con su potencial de lixiviación de la base de datos de mapas de suelos del USDA-NRCS (SSURGO, Bliss y Reybold 1989, Reybold y TeSelle 1999). Para ello utilizaron información específica en algunos de sus modelos y compararon los resultados observados. Los datos de un estudio de campo de dos años de ácido pentafluorobenzoico, ácido 2,6-difluorobenzoico y transporte de un herbicida (ácido 3,6-dicloro-2-metoxibenzoico) en barbecho y sistemas cultivados bajo dos regímenes de aplicación de agua se compararon con simulaciones usando el Movimiento Químico a través de los Suelos Estratificados (CMLS) y los modelos de Lixiviación y Estimación de Química (LEACHM) para simular el movimiento vertical de productos químicos seleccionados a través de la zona de raíces agrícolas sobre una base de capa por capa (Nofziger y Hornsby 1987). Se realizaron combinaciones de ambos modelos con bases de datos de SIG para realizar evaluaciones a escala regional de la lixiviación (Petach et al., 2001, Fussereau et al 2003, Hutson y Wagenet 2003, Wilson et al 2003, 2006). Inskeep et al (2016) variaron los parámetros de entrada del modelo de acuerdo con diferentes fuentes de datos.

Los insumos de los modelos se obtuvieron principalmente de la caracterización del perfil del suelo y de las mediciones específicas del sitio de precipitación, riego y evaporación de la cuenca. Las predicciones de LEACHM también se generaron utilizando la conductividad estimada y las funciones de retención. Las predicciones se generaron usando mediciones detalladas del sitio y el contenido volumétrico de agua estimado a partir de los datos texturales y el balance hídrico diario y la base de datos climática

MAPS (Nielsen et al., 2000). La comparación de los tiempos de recorrido de soluto promedio observado y simulado produjo los siguientes resultados: primero, tanto el modelo LEACHM como el CMLS funcionaron adecuadamente con insumos de información del modelo de alta resolución. En segundo lugar, el rendimiento del modelo disminuyó cuando las condiciones de campo presentaron flujo preferencial. En tercer lugar, los valores de conductividad hidráulica saturados estimados a partir de ecuaciones de regresión presentaron problemas para generar predicciones adecuadas usando el modelo LEACHM. En cuarto lugar, las predicciones CMLS fueron menos sensibles a la resolución de entrada de datos. Estos resultados demuestran la importancia de la validación de modelos y por eso sugieren las predicciones del modelo basado en los conjuntos de datos de entrada del modelo basados en SIG con baja resolución espacial pueden no reflejar con exactitud los procesos de transporte que se producen in situ.

Las herramientas tecnológicas proporcionan importantes oportunidades para identificar, recopilar y corregir errores en los datos existentes. Existe una oportunidad inmediata para promover el crecimiento acelerado y la utilización de los SIG para satisfacer las necesidades de recursos hídricos de la sociedad. El desarrollo de la infraestructura de la información espacial puede tener un impacto crucial en el papel que desempeña la información espacial en el acontecer de cada ciudadano en muchos aspectos de la vida, incluyendo los recursos hídricos. La disponibilidad de información sobre los recursos tendrá un impacto en la planificación a todos los niveles, desde el gobierno, pasando por las empresas y los agricultores hasta los ciudadanos en la atención de sus necesidades básicas. Se requerirá investigación para ofrecer mejores aplicaciones de la misma información para diferentes usuarios y/o propósitos.

El aumento del número de usuarios que utilizarán los datos de recursos hídricos para tomar decisiones importantes, aumenta la necesidad de definir metodologías confiables para estimar, visualizar y utilizar la incertidumbre. Esto es importante para los datos espaciales en general, pero es especialmente importante para los datos de recursos hídricos donde un pequeño cambio local puede tener un impacto importante. Varios de los proyectos de investigación han intentado evaluar la incertidumbre presente en varios

conjuntos de datos y/o métodos analíticos. Esa incertidumbre existe en todas las fases del ciclo de vida de datos geográficos, desde la recopilación hasta la representación, el análisis de datos y los resultados finales. Sin embargo, nuestro conocimiento de la incertidumbre en los datos geográficos y sus consecuencias para las decisiones de recursos hídricos tomadas utilizando GIS es incompleto. Se necesita más trabajo como el de Weih y Smith (1997), que rastrearon la influencia de los algoritmos de cálculo de la pendiente celular hasta una decisión común de manejo forestal, en el dominio de los recursos hídricos.

Esta conexión es obvia porque nuestra prosperidad continua depende de la gestión eficaz de los recursos hídricos y los SIG pueden ayudar con la recolección, almacenamiento, análisis y visualización de información clave y así ayudar con el desarrollo de programas y prácticas de recursos hídricos efectivos. No todos los problemas de recursos hídricos requieren SIG y modelos de simulación (por ejemplo, Lovejoy 1997); Sin embargo, aquellos que requieran soluciones tecnológicamente sofisticadas probablemente se beneficiarán de investigaciones y educación adicionales para asegurar que los resultados de los SIG puedan ser interpretados y utilizados apropiadamente

La gestión de los recursos hídricos es crucial a medida que buscamos formas de construir comunidades y estilos de vida ambiental y socialmente sostenibles. En algunos casos, necesitamos encontrar nuevos métodos para cambiar la oferta y la demanda de recursos hídricos. En otros casos, métodos más rápidos y eficaces para identificar y manejar las fuentes de contaminación. Los SIG pueden contribuir a la resolución de problemas en cada uno de estos casos. A un nivel más general, las tecnologías SIG pueden ayudar a guiar la adopción de políticas de recursos hídricos y promover una asignación más eficiente y equitativa de recursos naturales y comunitarios a medida que nos esforzamos por alcanzar los objetivos mencionados.

El progreso en los desafíos de investigación requiere de científicos especializados con atención especial al dominio de los recursos hídricos, en particular enfocados hacia (1) el desarrollo de nuevos modelos e investigación para demostrar cualitativamente cómo

imitan el mundo real. Estos modelos deben ser dinámicos e incorporar insumos geográficamente distribuidos que se deriven de la medición e interpolación; (2) la continuación del trabajo de representación. Considerando advenimiento de varias herramientas de recopilación de datos por medio de técnicas de detección remota, junto con el incremento de las capacidades de almacenamiento y distribución de la World Wide Web (www), se incrementará el volumen y la calidad de la información potencialmente disponible. Con estas herramientas se generará más representación (Kemp 1997a, 1997b, Robinson y Mackay 1996) y opciones de clasificación (Corbett y Carter, 1996). A su vez, promoverán el desarrollo continuo de nuevos modelos distribuidos geográficamente como los de Julien et al (1995), Mitasova et al. (1996), Vieux et al. (1996); (3) el desarrollo e inclusión de nuevas funciones de análisis espacial dentro del SIG. Por ejemplo, las herramientas de análisis de terreno, lógica borrosa, geoestadística y visualización (es decir, animaciones 3D para mostrar patrones que varían espacialmente a través del tiempo) podrían extenderse (por ejemplo, Mitas et al 1997, Mitas y Mitasova 1998, Wilson Y Burrough 1999). También se requiere investigación adicional para especificar reglas y guías para conocer cuándo se deben usar estas herramientas. (Mackay y Band 1998).

Los SIG son una excelente material para explorar muchos aspectos de los recursos hídricos, incluyendo el monitoreo de almacenamiento y flujo de agua en comunidades rurales y urbanas, monitoreo de ríos, hidrología de aguas superficiales y subterráneas, ingeniería de riego, prácticas agrícolas, ecología de humedales, y muchos otros. El hecho de asumir estos desafíos en la investigación SIG y los tipos de modelos de la simulación y de sistemas espaciales tendrá importantes implicaciones.

2.2 Conceptos de modelado espacial

El modelado espacial es una estrategia que permite la comprensión de los fenómenos de la realidad desde el punto de vista de su posición, forma, comportamiento y evolución, de manera que para estudiar a los territorios y todos sus elementos, se adquieren una serie de reglas paramétricas asociadas a la medición y análisis de los recursos naturales, el uso de suelo, los crecimientos urbanos y rurales, los fenómenos meteorológico-climáticos, los desastres naturales, los procesos de urbanización y planeación y muchos otros análisis de diversos ámbitos. De tal manera que se hará una descripción sobre los mecanismos y metodologías científicas que son utilizadas en la actualidad para estudiar de manera precisa a la diversidad de fenómenos desde el punto de vista geoespacial.

2.2.1 Modelos de distribución espacial

Uno de los procesos metodológicos científicos refiere al Análisis Multicriterio, del cual importantes autores coinciden en reconocer estos mecanismos como una importante herramienta para la toma de decisiones en aspectos de análisis ambientales, sociales y económicos. Que además, confluyen una pluralidad de escalas de medición: físicas, monetarias, cualitativas, etc. (Adiat et al., 2012, Janssen, 1992; Lahdelma et al., 2000; Linkov et al., 2006; Munda, 1995; Regan et al., 2007; Steele., 2009; Yatsalo et al., 2007). Malczewski (1999) establece que cualquier análisis multicriterio es un procedimiento de tres etapas que implica: (a) la selección de los factores y restricciones con la posterior elaboración de mapas que describan la distribución espacial de dichos factores a nivel pixel; (b) la asignación de un peso a cada factor y (c) la combinación de factores, restricciones y ponderaciones forman un mapa final de análisis multicriterio.

La toma de decisiones multicriterio ofrece herramientas para la solución de aquellos problemas donde los diversos puntos de vista deben de ser evaluados, no necesariamente como soluciones óptimas, por lo que las decisiones son más flexibles que en las técnicas clásicas (Levis, 1999). La mayor ventaja de los métodos multicriterio es que permiten considerar un amplio número de datos, relaciones y objetivos, que generalmente están

presentes en un problema de decisión específica, de tal modo que el problema a manejar puede ser estudiado de una manera multidimensional para tener un acercamiento más apegado a la realidad.

Una gran variedad de estudios han sido realizados aplicando el análisis multicriterio en estudios de geociencias o hidrología para la determinación del potencial del establecimiento de rellenos sanitarios donde se evalúan las propiedades geológicas para la protección de los mantos acuíferos y evitar percolaciones de sustancias peligrosas (Kallali et al., 2007; Pedrero et al., 2011; Valle et al., 2015), para la estimación de zonas con potencial de aprovechamiento de agua subterránea mediante técnicas de percepción remota y SIG (Madricci et al., 2008; Adballa, 2012; Adiat et al., 2012) para diseñar las estrategias de manera a satisfacer las demandas urbanas de agua (Durga, 2005; Moglia et al., 2012; Scholten et al., 2014), y la evaluación de la calidad del agua subterránea y superficial, donde se evalúan riesgos de contaminación por diversos factores (Khadan y Kaluarachi, 2003; Tobiszewski y Orłowski, 2015; Walker et al., 2015, entre otros).

Otro proceso de modelaje son los Pesos de Evidencia. La modelación de pesos de evidencia (PE) fue originalmente desarrollada para diagnósticos médicos por Lusted (1968). En lo que se refiere a estudios geoespaciales este método se ha utilizado principalmente para identificar el potencial minero (Carranza y Hale, 2003), y actualmente se utiliza para estimar la productividad del potencial de agua subterránea (Lee et al., 2012). Para implementar este método se requiere de entrada un mapa binario con las ubicaciones de los pozos, que representan la variable de interés. Mientras que los mapas generados muestran la probabilidad de ocurrencia y la incertidumbre asociada (error) a las estimaciones de probabilidad.

Las Creencias de Evidencia. Son unos procesos de modelado adecuándose a una generalización de la teoría bayesiana de probabilidad subjetiva. La principal ventaja de este modelo es que tiene una flexibilidad relativa al aceptar la incertidumbre y la capacidad de combinar las creencias de múltiples fuentes de parámetros: grado de creencia, grado de incredulidad, grado de incertidumbre y grado de verosimilitud en el

rango de [0,1] (Carranza y Hale, 2003; Carranza et al., 2008; Althuwaynee et al, 2012; en Tahmassebi et al., 2016). El resultado es un mapa de probabilidad con valores entre 0 y 1 (Carranza y Hale, 2003).

El método ha sido aplicado para el mapeo de susceptibilidad de deslizamientos geológicos o zonas con potencial de recarga de aguas subterráneas (Awawdeh et al., 2013; Mogaji et al., 2016, Manap et al., 2014; Fenta et al., 2015). El modelo de creencias de evidencia (MCE) es un reconocido modelo de predicción espacial, un enfoque flexible y útil en la formalización de abordar los problemas de la gestión inadecuada de la incertidumbre (Lee et al., 2012 a, b) que permite el análisis tanto de la incertidumbre sistemática como escolástica (Mogaji et al., 2014; Fenta et al., 2015) contrastando con los primeros modelos de minería de datos que solo son capaces de manejar la incertidumbre estocástica, ignorando la incertidumbre sistemática.

El Modelado Relación de Frecuencia, se emplea para obtener el peso de la clase que indica la importancia relativa de las clases individuales para cada variable (Mondal y Maiti, 2013). El modelo es capaz de proporcionar una herramienta sencilla de evaluación geoespacial para calcular la relación probabilística entre variables dependientes e independientes (Oh et al., 2011). El modelo se utiliza para predecir el potencial de productividad de agua. Oh et al. (2011) establecieron los datos de productividad como variables dependientes, y manejados en forma binaria asignándoles el valor de 1 para el éxito y 0 para el fracaso, mientras que los factores que influyen en la productividad fueron tratados como variables independientes.

Finalmente el Modelado de Regresión Logística. Se describe como otra estrategia en la que el principio de este método consiste en asociar una variable con respuesta binaria a una o más variables independientes. Se usa ampliamente para mapear la probabilidad de ocurrencia de un evento a nivel de pixel (Pineda-Jaimes et al., 2009; Sifuentes-Amaya y Ramírez-Velarde, 2010).

2.2.2 Metodologías para el modelado espacial del agua

Para realizar el análisis multicriterio en ámbitos de los recursos del agua, existen diversas estrategias tal como la que describe Abdalla (2012) quien propone una metodología asignando un peso en función de su influencia o contribución en el almacenamiento de agua. Cada capa es estandarizada dividiendo la calificación del mapa entre la suma total de la calificación de las capas. Por otra parte, se designan clases para las categorías del mapa. Estas clasificaciones reciben una ponderación en una escala que va de 1 a 4, donde 4 es la más favorable y 1 es la menos favorable, dependiendo de su capacidad para almacenar y/o favorecer el flujo de agua. La ponderación de cada clase se divide por el valor total de la suma de las clases de cada capa para calcular los valores de capacidad (CV_i) estos valores de CV_i se multiplican por el peso respectivo de la capa de probabilidad en cada capa temática para calcular el mapa de potencial de agua.

El mapa obtenido estima el potencial de agua en la zona de estudio y se calcula matemáticamente usando las siguientes fórmulas en el software ENVI v 4.7:

$$GWP = \sum w_i \cdot CV$$

donde GWP = potencial de agua subterránea, W_i = pesos de cada mapa temático y CV_i = valor de capacidad. Mientras que:

$$GWP = \sum (Dr, Lin, Sl, Geo, Top)$$

donde: Dr = Densidad de la red de corrientes, Lin = Densidad de lineamientos Sl = Densidad de pendiente, Geo = Clases de geomorfología y Top = Clases de topografía.

El método pesos de evidencia involucra ciertos pasos: (1) la estimación de una probabilidad *a priori*, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un evento a predecir en una unidad de área, sin que exista información adicional; (2) el cálculo de las ponderaciones positivas y negativas para cada mapa predictor binario; (3) la aplicación de

una prueba de independencia condicional de cada par de entrada de los mapas con respecto a los puntos de ocurrencia del evento, que puede dar lugar al rechazo o la fusión de algunos mapas binarios de predicción; y (5) la aplicación de una prueba de bondad de ajuste para probar la hipótesis general de independencia condicional (Bonham-Carter, 1989). Utiliza la forma log-lineal del modelo de probabilidad bayesiana para estimar la importancia relativa de las evidencias. El método calcula el peso para una cierta categoría de un factor predictivo (señalado como F), basado en la presencia o ausencia del evento a predecir (Lee et al., 2012).

$$W^+ = \log_e \left(\frac{P\langle F|E \rangle}{P\langle F|\bar{E} \rangle} \right)$$

$$W^- = \log_e (P\langle \bar{F}|E \rangle / \langle \bar{F}|\bar{E} \rangle)$$

$$C_w = W^+ + W^-$$

El peso positivo (W^+) indica qué tan importante es la presencia del factor F para predecir el potencial de agua subterránea. Si $W^+ > 0$, la presencia del factor F contribuye a la presencia de potencial de agua subterránea. Mientras que el peso negativo (W^-) indica que tan importante es la ausencia del factor F para predecir el potencial de agua subterránea; si $W^- = 0$, la ausencia del factor F no es relevante; si $W^- < 0$, la ausencia del factor F contribuye a la ausencia de potencial de agua subterránea, el W^+ y W^- representan los pesos cuando un factor está presente (relevante) y ausente (no relevante), respectivamente.

El contraste C_w mide la correlación entre la predicción del modelo y las ocurrencias del potencial de agua subterránea. Cuando $C_w > 0$, existe una asociación positiva entre las probabilidades predichas y observadas; cuando $C_w = 0$, no existe una asociación entre dichas probabilidades. Por lo tanto, C_w refleja la asociación espacial global entre el factor relevante y el evento.

Entre las principales aplicaciones de este método se encuentran el mapeo de la productividad del agua subterránea, para definir zonas con un alto potencial del recurso hídrico (Corsini et al., 2009; Ozdemir, 2011; Lee et al., 2012; Oikonomidis et al., 2015); la vulnerabilidad de los acuíferos a agentes químicos contaminantes, propuestas para la protección y gestión de las aguas subterráneas (Masetti et al., 2008; Sorichetta et al., 2011; Sorichetta et al., 2012; Chenini et al., 2015); y la vulnerabilidad de las aguas subterráneas debido a actividades agrícolas (Ozdemir y Altural, 2013; Rodríguez-Galiano et al., 2014; Xie et al., 2015); o bien, para delinear las zonas de potenciales de recarga de acuíferos (Senanayake et al., 2015), entre otros.

La metodología en el modelo pesos de evidencia (Dongli et al., 2011), consiste en calcular la probabilidad anterior y la probabilidad posterior. El método involucra ciertos pasos: 1) la estimación de una probabilidad *a priori*, es decir, la probabilidad de ocurrencia de un evento a predecir en una unidad de área sin que exista información adicional; 2) el cálculo de las ponderaciones positivas y negativas para cada mapa predictor binario; 3) la aplicación de una prueba de independencia condicional de cada par de entrada de los mapas con respecto a los puntos de ocurrencia del evento, que puede dar lugar al rechazo o la fusión de algunos mapas de entrada; 4) el cálculo de probabilidad posterior y la incertidumbre para cada combinación única de superposición de los mapas binarios de predicción; y 5) la aplicación de una prueba de bondad de ajuste para probar la hipótesis general de independencia condicional (Bonham-Carter, 1989). En la predicción metalogénica como ejemplo, suponiendo que el área de estudio se divide en unidades T de igual tamaño, incluyendo unidades D por unidad de mineral. Para cualquier factor de evidencia, su peso se define como:

$$W^+ = \ln \left[\frac{P\left(\frac{B}{D}\right)}{P\left(\frac{\bar{B}}{D}\right)} \right] \quad W^- = \ln \left[\frac{P\left(\frac{\bar{B}}{D}\right)}{P\left(\frac{B}{D}\right)} \right] \quad (1)$$

Donde, W^+ y W^- respectivamente son el peso de los factores de área existente y el área inexistente, y para el área donde existe pérdida de datos de origen, el valor de éstos es

ceros. \bar{B} es el número de celda para los factores de evidencia ausentes, y \bar{D} es el número de celda. Las probabilidades condicionales son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 P\left(\frac{B}{D}\right) &= D \cap \frac{B}{D} \\
 P\left(\frac{\bar{B}}{D}\right) &= \bar{D} \cap \frac{B}{D} \\
 P\left(\frac{B}{\bar{D}}\right) &= D \cap \frac{\bar{B}}{\bar{D}} \\
 P\left(\frac{\bar{B}}{\bar{D}}\right) &= \bar{D} \cap \frac{\bar{B}}{\bar{D}}
 \end{aligned} \tag{2}$$

En este método, la condición es que cada factor de evidencia encuentre las condiciones de independencia relativas al punto de distribución. Para un número n de factores de evidencia, si se satisfacen condiciones anteriores, la posibilidad de que cualquier unidad k sea la celda buscada es la probabilidad posterior, es decir, O y se expresa usando el logaritmo:

$$\ln(O) = \ln\left(\frac{D}{T-D}\right) + \sum_{j=1}^n W_j^k \quad ((j = 1,2,3, \dots, n)) \tag{3}$$

donde, W_j^k es el factor de evidencia j ,

$$W_j^k = \begin{cases} W_j^+ & \text{existe factor de evidencia } j \\ W_j^- & \text{no existe el factor de evidencia } j \\ 0 & \text{datos originales perdidos} \end{cases}$$

Los resultados iniciales están basados en la teoría de probabilidad condicional, sin embargo, los modelos de peso de evidencia desarrollados adquieren mayor precisión. El

modelo de pesos de la evidencia, es utilizado en importantes estudios de investigación y localización de recursos naturales como un importante modelo predictivo.

Modelo de relación de frecuencias. Esta metodología considera, para un evento (E) y ciertos factores (F) atribuidos, la relación de probabilidad de frecuencia de E , es la relación de la probabilidad condicional, determinada por la siguiente relación:

$$P\{E|F\} = (P\{E \cap F\})/(P\{F\})$$

donde E = evento de interés; F = factores involucrados o variables explicatorias.

La relación de frecuencia se puede implementar usando las herramientas existen en un SIG. Por otra parte, este trabajo también se puede complementar mediante la realización de un análisis de sensibilidad para medir el impacto de cada factor involucrado.

El método de regresión logística tiene amplio uso para el mapeo del potencial de agua subterránea y la variación del nivel freático (Nampak et al., 2014; Celik, 2015); para el modelado de la estimación de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación a causa de diversos factores (Venkataraman y Uddameri, 2012; Mair y El-Kadi, 2013; Jang y Chen, 2015); y el mapeo para el análisis de la susceptibilidad a deslizamientos geológicos (Yilmaz, 2009; Wong et al., 2013), entre otros. Se define conforme a la siguiente ecuación:

$$p(y) = \frac{e^{(\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}}{1 + e^{(\beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \dots + \beta_k X_k)}}$$

donde p = probabilidad de ocurrencia de un evento; X_k = variables explicatorias; y β_k = parámetros estimados mediante el método de máxima verosimilitud.

En la actualidad se están adecuando diversas metodologías que aprovechan los insumos de datos matriciales provenientes de los procesos del tratamiento de imágenes de satélite,

las ventajas paramétricas de los SIG y el mecanismo de una diversidad de modelos establecidos que se conforman como algoritmos y fórmulas para el análisis multicriterio, llevando a la generación de modelos de distribución espacial, los cuales se integran con las determinadas variables que permiten una gran variedad de análisis espaciales específicos y *had hoc* a las necesidades del objeto de una investigación.

Para este estudio de investigación, se describe a continuación sobre los procesos metodológicos previos, llevados a cabo para generar un modelo de distribución espacial del agua según la determinación de variables y datos sobre las cuencas del estado de San Luis Potosí. Para todos los procesos fue necesario efectuar análisis geoestadísticos exploratorios y que en su momento fueron validados para el tratamiento de datos de las diversas épocas de años, en las cuales fueron utilizados datos que se obtuvieron de la CONAGUA, datos vectoriales de las bases de datos del INEGI e imágenes de satélite que se descargaron para su tratamiento en los diversos sitios del estado de San Luis Potosí.

2.3 Caso de estudio

Ejemplo de análisis geoestadísticos determinados para cálculos de evapotranspiración, distribución del PIB y distribución del valor de servicio ambiental en diferentes épocas, considerando sequía y lluvia, durante los últimos 25 años.

Año 1990 época de sequía

Como primer paso se realizó el análisis exploratorio al conjunto de puntos de las estaciones meteorológicas de la CONAGUA (temperatura y precipitación). El cual consistió en observar cómo se comportan los datos en cuanto a su distribución y normalidad. El análisis del histograma, normal QQplot y el análisis de tendencias forman parte de la fase llamada análisis exploratorio.

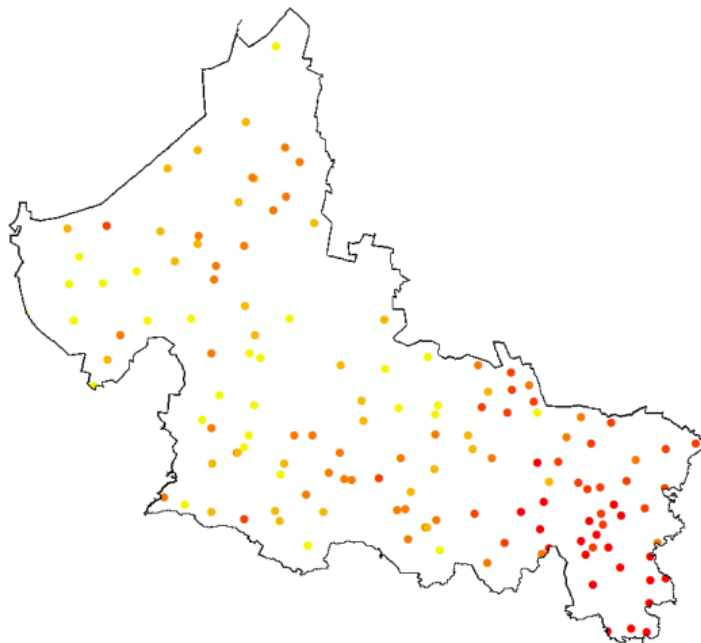


Imagen 1 Distribución espacial de la información proporcionada por CONAGUA.

Análisis del histograma. El histograma es una serie de una orden de rectángulos que representan a una ordenación tabular de los datos en clases y con las frecuencias correspondientes a cada clase. En este caso analizar el histograma sirvió para determinar

si los datos tienen una distribución normal, su simetría y frecuencia. El histograma de los datos de evapotranspiración real calculados para el año 1990 en la época de sequía en este proceso, ha indicado que de acuerdo a un total de 142 puntos existe un sesgo positivo, lo cual quiere decir que la curva de simetría esta sesgada hacia la derecha. La curtosis muestra una distribución ligeramente anormal. En resumen, los datos tienen una distribución casi normal y no necesitan de una transformación en este paso para alcanzar la normalidad.

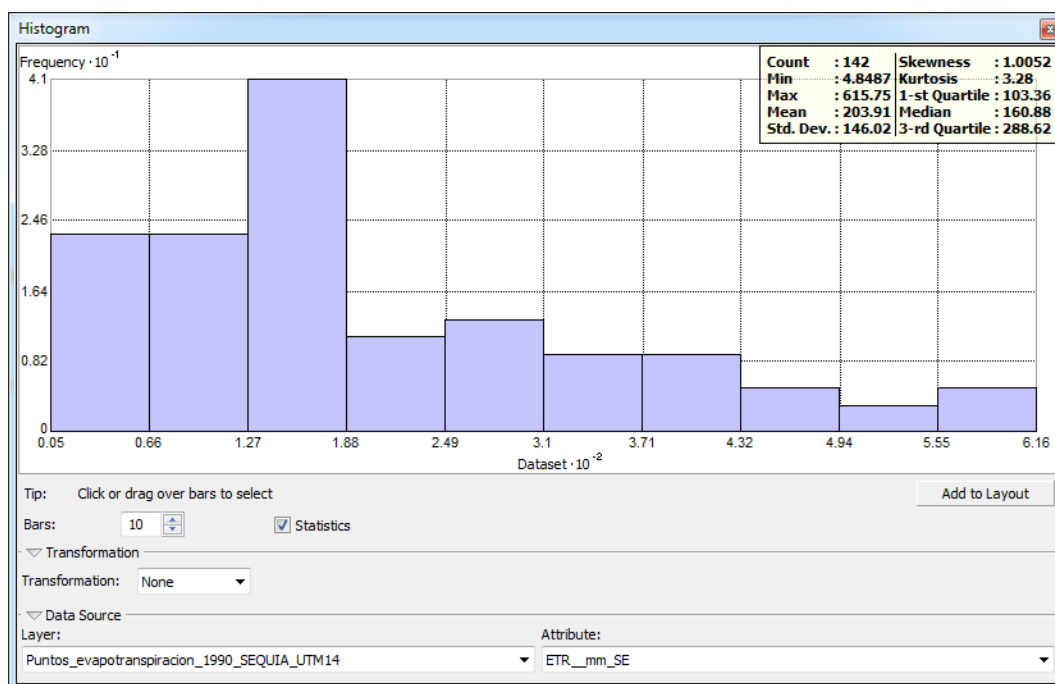


Imagen 2. Histograma de los datos de evapotranspiración real para el año 1990.

Análisis de la gráfica Normal QQplot. La gráfica del Normal QQplot es útil para conocer qué tan cerca están nuestros datos de un comportamiento normal, entre más cerca estén los puntos de la línea de normalidad quiere decir que los datos tienden a ser normales. En estos puntos con evapotranspiración calculada se observa que los puntos más cercanos a la línea se encuentran en la parte central, mientras que los puntos extremos se encuentran dispersos. Esto significa que existe una dispersión en los datos.

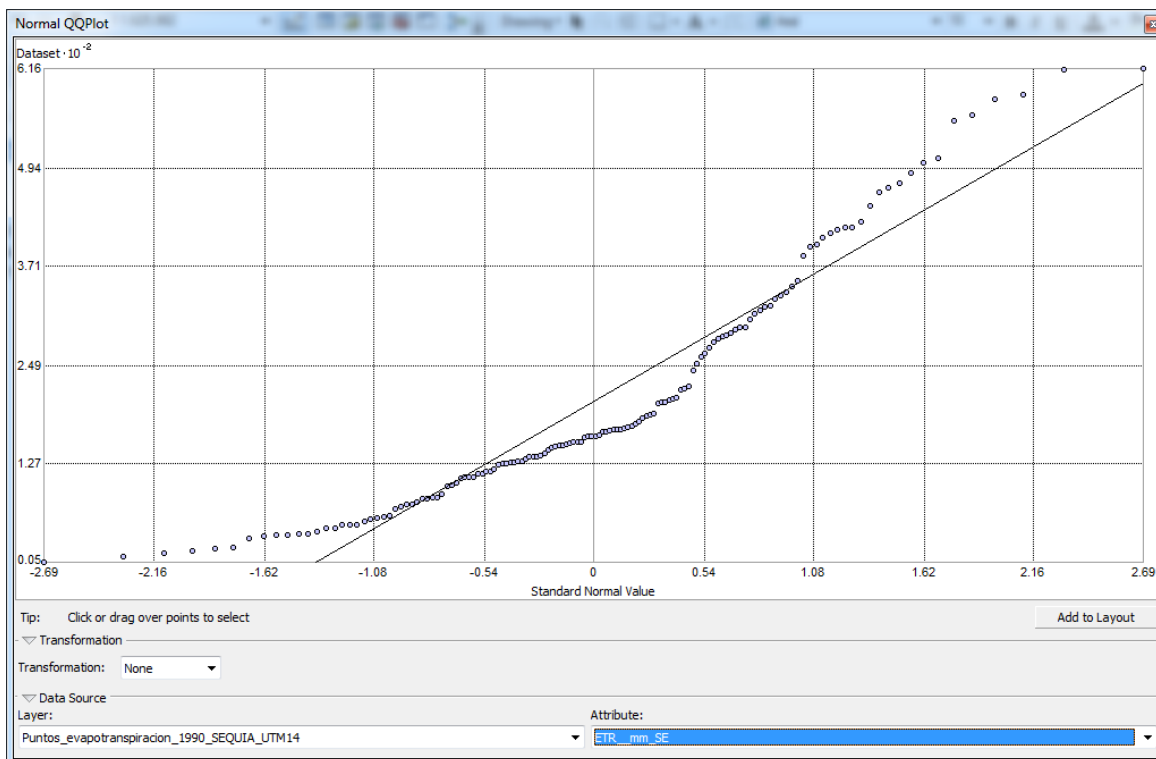


Imagen 3. Gráfica Normal QQplot para los datos de evapotranspiración 1990.

Análisis de tendencias. Mediante el análisis de tendencias se puede conocer si los datos puntuales tienen algún patrón o tendencia en función de la ubicación geográfica. Para estos datos se observan tendencias de primer orden, en cualquiera de sus direcciones.

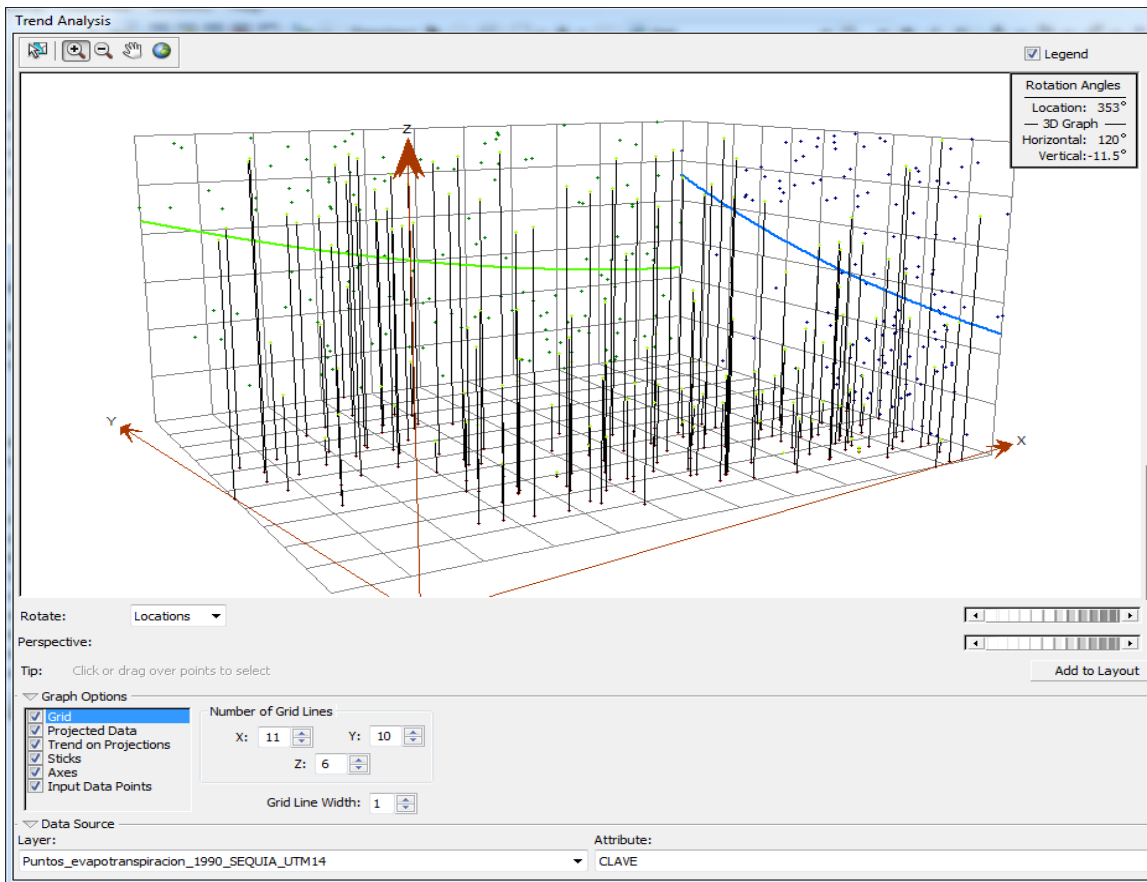


Imagen 4. Análisis de tendencias.

Procedimiento para realizar una simulación gaussiana. Una simulación gaussiana permite realizar una recreación del fenómeno a tratar, mediante el uso de un modelo geoestadístico del tipo kriging simple. El resultado obtenido es una superficie de valores estimados muy cercanos a la realidad. El formato de salida es del tipo ráster.

Kriging simple. Una vez realizado el análisis exploratorio a los datos se procedió a utilizar la herramienta *Geoostatistical Wizard*, que consiste en una serie de pasos para obtener una superficie de valores mediante métodos de interpolación. El primer paso consiste en indicar que se realizará un método geoestadístico del tipo kriging/co-kriging, además identificar el conjunto de datos con el cual se trabajará, para este caso, se

utilizaron los datos de evapotranspiración registrados para el año 1990, en época de

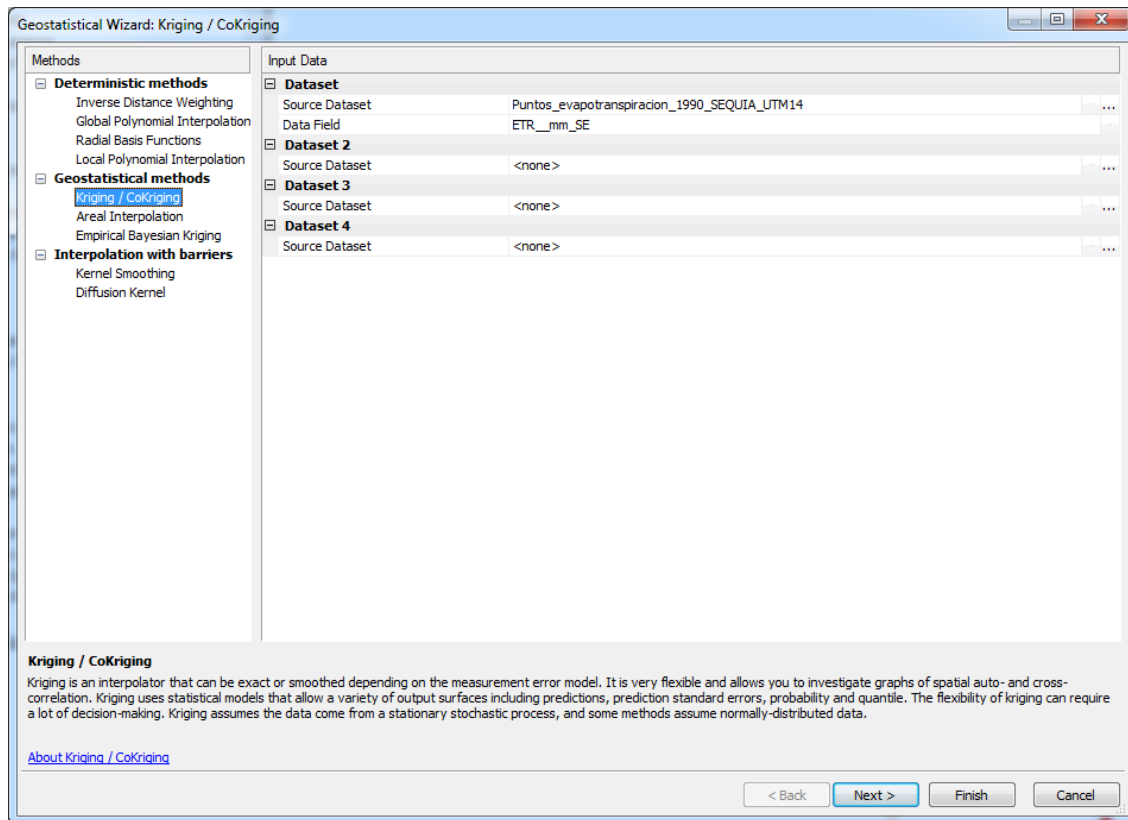


Imagen 5. Kriging simple.

sequía. La variable analizada fue la evapotranspiración.

A continuación se indicó que el tipo de Kriging es simple, pues éste es el requerido para la simulación gaussiana. Se aplicó una transformación Normal Score a los datos, la cual permite observar el comportamiento de éstos conforme se acercan más a la normalidad a lo largo del área de estudio. Para esto no es necesario que se desagrupen datos, pues no hay conjuntos de datos agrupados en determinadas áreas. Finalmente en el análisis exploratorio de los datos se observaron tendencias de primer orden, por tanto se indica que se deben remover ese tipo de tendencias.

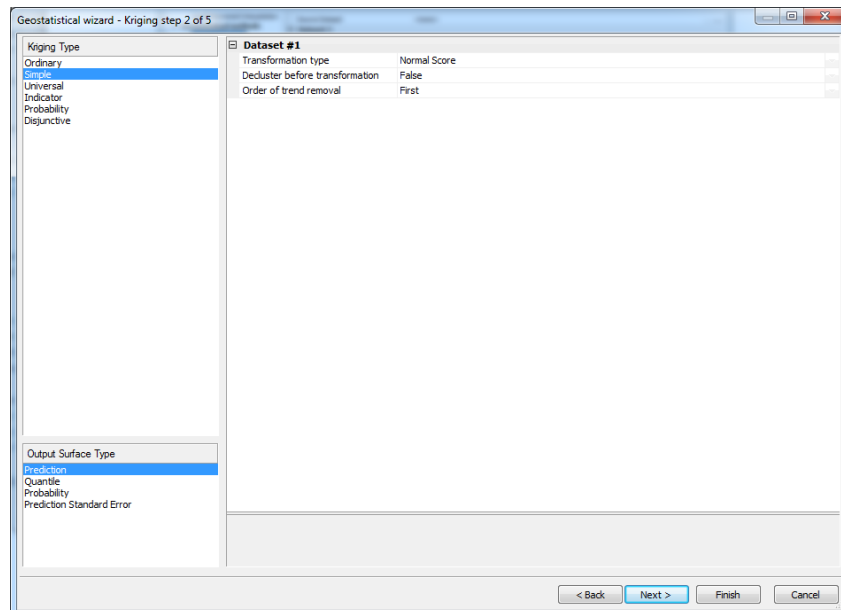


Imagen 6. Transformación Normal Score.

En el siguiente paso se muestra la eliminación de las tendencias mediante la función de kernel del tipo exponencial:

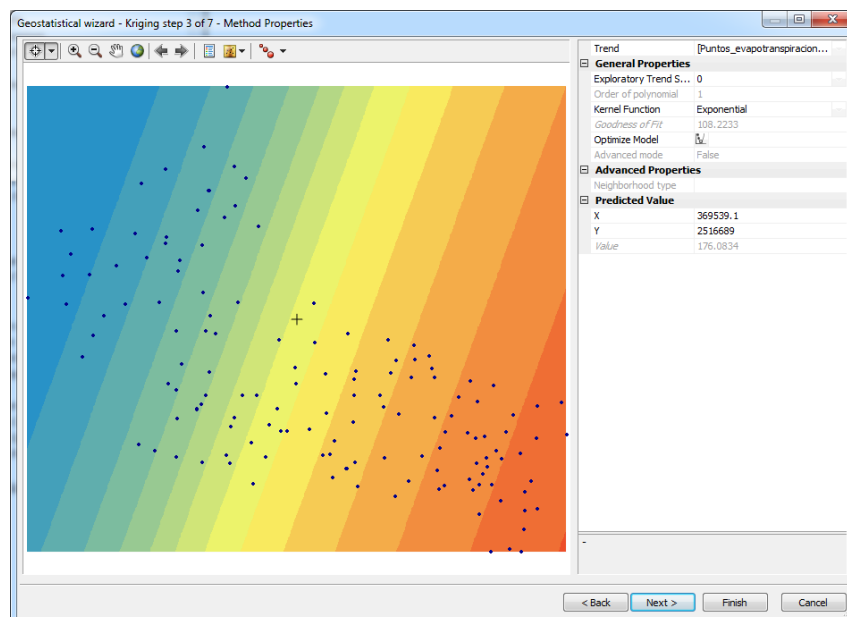


Imagen 7. Eliminación de las tendencias.

A partir de aquí se realizó la transformación del tipo Normal Score. Una manera de observar la diferencia es mediante la gráfica Normal QQplot, en donde se observa que los puntos se aproximan a una distribución normal.

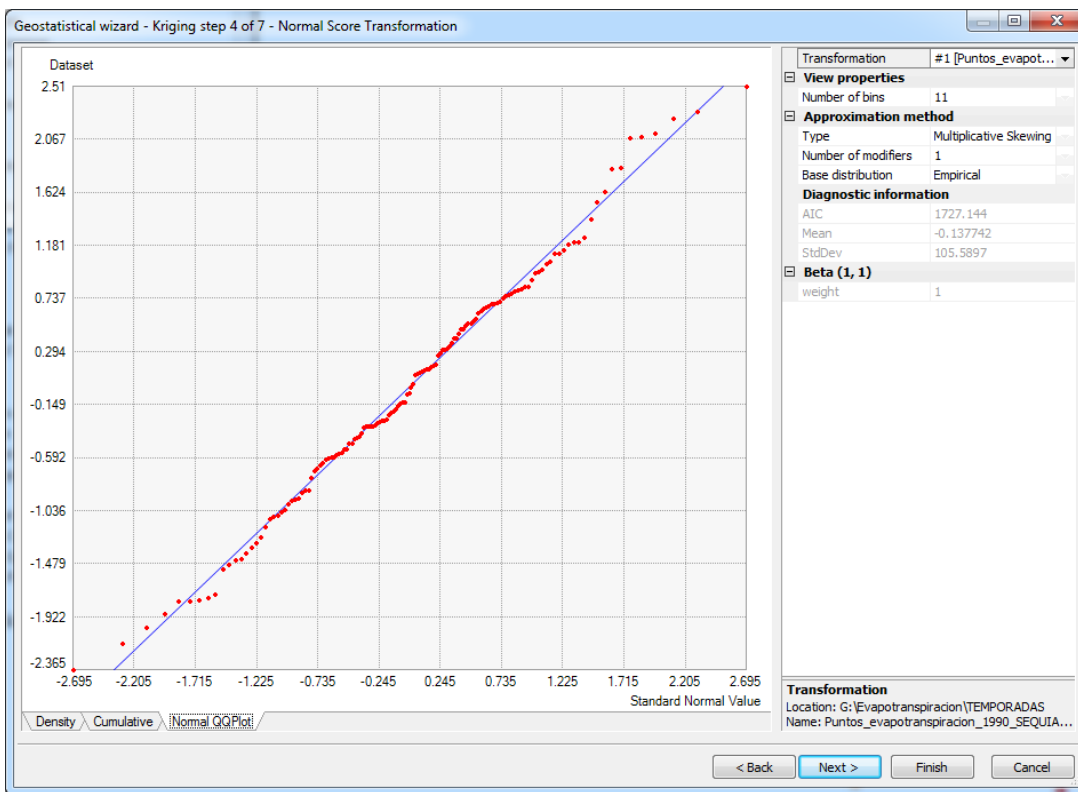


Imagen 8. Transformación Normal Score.

En este paso se muestra el semi-variograma resultante de la nube de puntos, que fue ajustado a un modelo teórico esférico. De igual manera, se observa que existe anisotropía en los datos, es decir, que se observa una variación de valores en cualquier dirección.

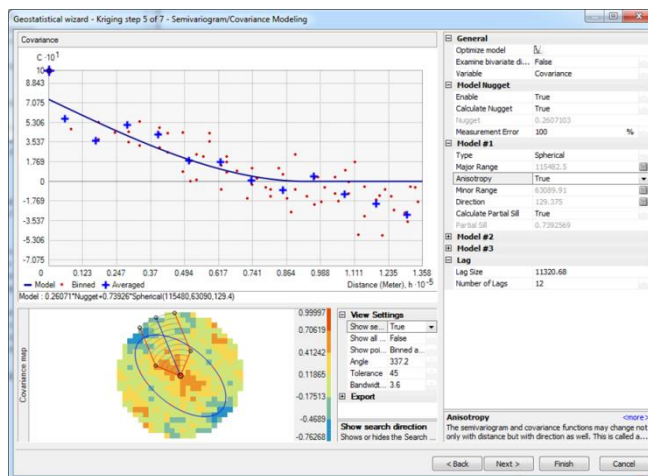


Imagen 9. Semivariograma resultante de la nube de puntos.

Esta gráfica permite observar cuales son los puntos que dan paso para la predicción de un nuevo valor. Esto de acuerdo a la elipse de cuatro sectores.

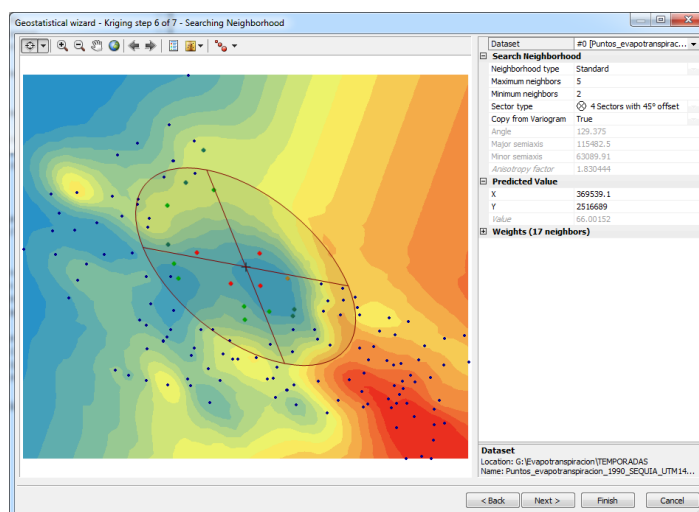


Imagen 10. Elipse de los cuatro sectores.

Finalmente se obtuvieron los distintos errores calculados a partir de los datos, en donde podemos observar que mientras la línea azul que representa la distribución de los datos esté cercana a la línea gris que representa la normalidad, por lo que se considera un error menor.

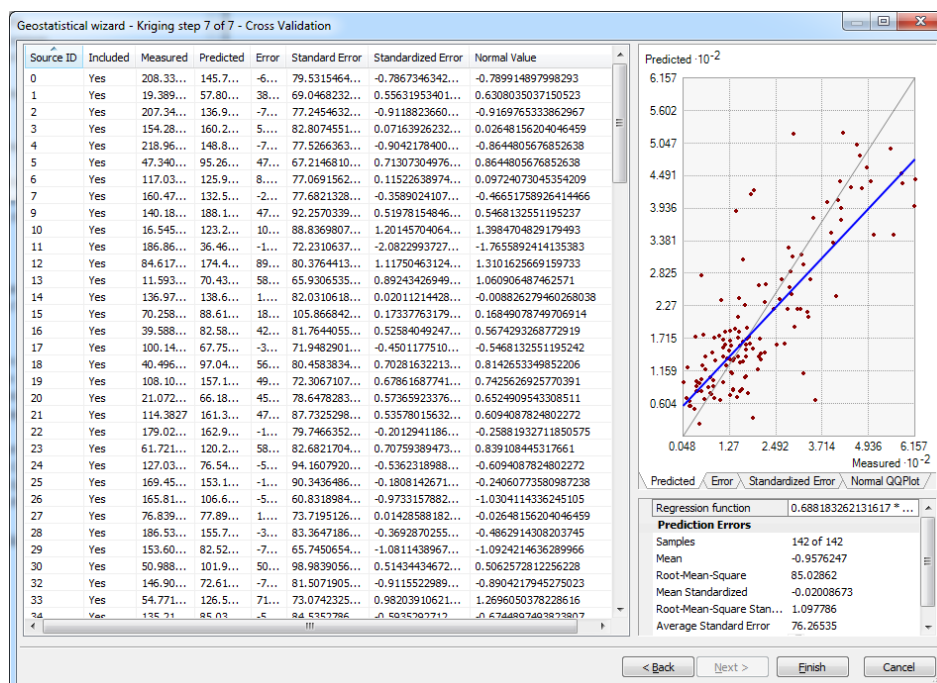


Imagen 11. Análisis de la distribución de datos respecto de la normal.

El resultado final del método Kriging simple, es una superficie de distribución de valores estimados a partir de distintos datos puntuales.

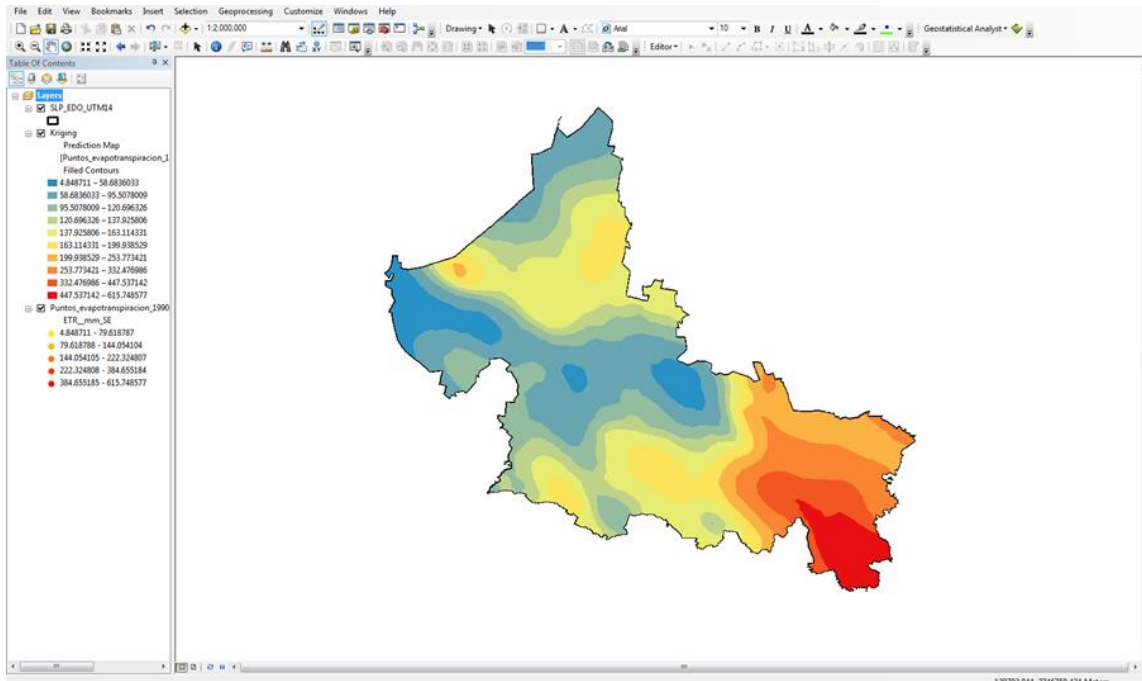


Imagen 12. Distribución de valores estimados.

Simulación gaussiana. La herramienta que se utilizó para realizar este proceso se encuentra en la caja de herramientas de ArcGis en Geoestatistical analyst tools / simulation / Gaussian Geoestatistical Simulations. Mediante esta herramienta se introduce el dato de entrada, el cual es el Krigin Simple realizado anteriormente. El número de realización o iteración es el número de veces que el proceso se ejecutará, el cual puede ser igual al número de puntos y en este caso se realizaran 20 iteraciones. El nombre de salida de los archivos se indica como ETR (Evapotranspiración Real). El tamaño de pixel se queda por defecto, pues posteriormente se realizará un remuestreo del archivo. El tipo de raster a obtener será el del valor promedio. Con estos datos ejecutamos el proceso para obtener la simulación de la evapotranspiración para el estado de San Luis Potosí.

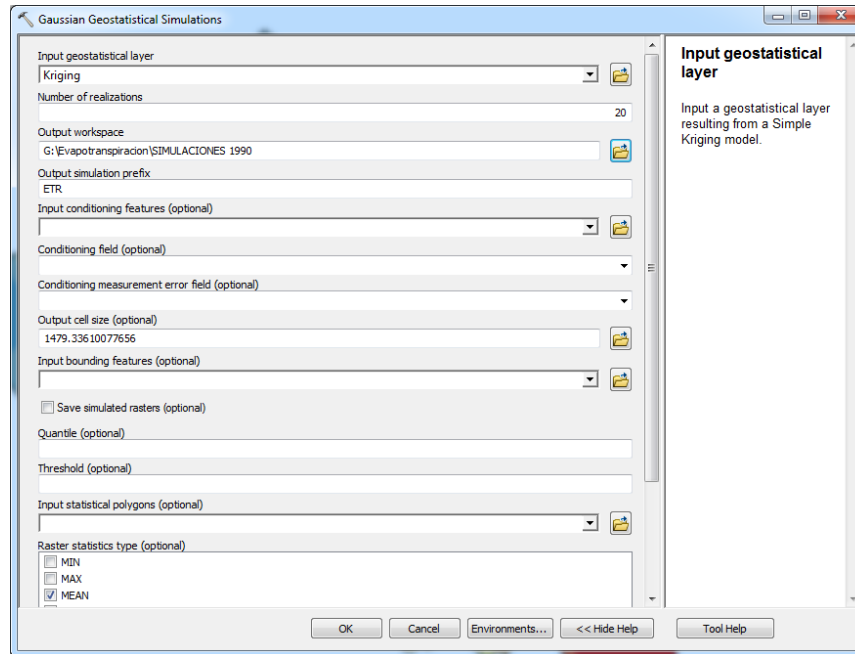


Imagen 13. Herramienta Gaussian Geostatistical Simulations.

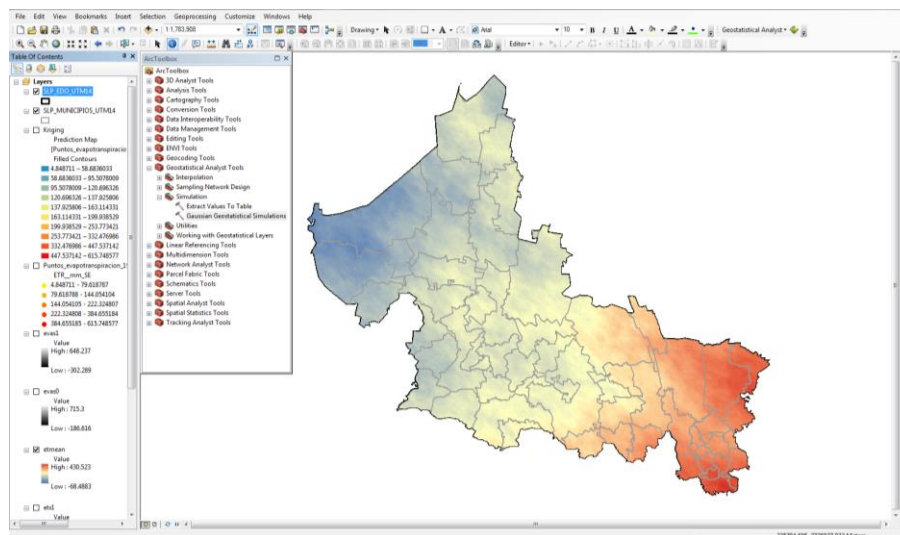


Imagen 14. ETR espacialmente distribuida para el estado de San Luis Potosí.

Los procesos metodológicos anteriormente descritos fueron utilizados para realizar los cálculos de la distribución del Producto Interno Bruto PIB, de la distribución del valor de

servicios ambientales, ambos para las diferentes épocas de años atrás en procesos multitemporales, y que serán descritos en el siguiente capítulo de manera ordenada.

Capítulo 3

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL AGUA SEGÚN LA DETERMINACIÓN DE VARIABLES

3.1 Introducción

Con el objeto de obtener un mejor conocimiento sobre los yacimientos del agua en las cuencas del estado de San Luis Potosí, México, se presenta una propuesta que se encamina a definir una estrategia de distribución espacial del recurso, de manera a asociar las áreas en que éste se encuentra distribuido en la superficie del estado con los usos y aprovechamientos del mismo. El fin de esta estrategia, es de eficientar una adecuada planeación de perspectivas sustentables y la seguridad del recurso. Para tal efecto, se utilizó una metodología que permite estimar a través de procesos y análisis geoespaciales (uso de imágenes de satélite, SIG y análisis geoestadísticos), una serie de variables y parámetros permitiendo la conceptualización de un modelo de distribución espacial, que describe un patrón de comportamiento de los recursos hídricos coexistentes en las 4 regiones del estado, en diversos periodos de años analizados de las últimas tres décadas.

3.2. Materiales y métodos

La metodología utilizada consistió en primer lugar en efectuar una modelización conceptual de la problemática, utilizando un modelado UML (Unified Modeling Language), enseguida se efectuó una revisión del estado del arte de la problemática a nivel global (macro y luego específica en el estado). Posteriormente, se efectuó una recopilación de información proveniente de las instancias en el estado que manejan la gestión del agua (CONAGUA, CEA, COTAS, etc.), la búsqueda de reportes o artículos referentes al uso y manejo del agua, así como información relevante e los gastos y aprovechamientos registrados de los censos piezométricos y estudios hidrológicos de las regiones del estado.

Se determinó y clasificó el valor del Producto Interno Bruto (PIB) del estado, de manera a asociar su orden industrial y de desarrollo económico de las diversas regiones que lo conforman, lo cual permitió considerar el requerimiento hídrico asociado al orden del desarrollo del PIB en las últimas tres décadas y que ha sido abastecido por las instancias de la gestión del agua en el estado. Así mismo, se clasificó a las regiones del estado en lo respectivo a concentraciones de biodiversidad, niveles acumulados de humedad y elementos de la evapotranspiración. Tales análisis se asociaron a una serie de procesos de tratamiento de imágenes de satélite (datos del sensor Landsat 5 TM y 8 OLI/TIRS, ambos con una resolución espacial de 30 metros), las cuales tienen la cobertura a escala de las cuencas del estado y que se generaron en los periodos de secas y de lluvias de 1990, 2000, 2010 y 2015, mismas que fueron integradas en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para definir con diversos parámetros espaciales, el comportamiento y concentración del recurso en todos los municipios.

Una vez el tratamiento de las imágenes efectuado, éste se integró en ArcMAP para efectuar un proceso de análisis espacial a fin de determinar indicadores geoestadísticos con las variables determinadas de las concentraciones de biodiversidad, humedad, evapotranspiración y elementos del gasto asociado al requerimiento hídrico, según el PIB registrado en las diferentes épocas de análisis en las regiones del estado.

Como resultado de los tratamientos en los diversos procesos utilizados, posteriormente, se generó una serie de cartas temáticas que describen los análisis del modelo de distribución espacial resultante y sus indicadores descriptivos.

3.3. Área de estudio

El estado de San Luis Potosí se ubica en los paralelos $21^{\circ} 09' 30''$ y $24^{\circ} 33' 09''$ latitud norte y los meridianos $98^{\circ} 19' 52''$ y $102^{\circ} 17' 51''$ longitud oeste (Figura 1). Cuenta con una superficie de $61,138 \text{ Km}^2$ lo cual representa el 3.2 % de la superficie del país. Dividido en 4 regiones: Altiplano, Centro, Media y Huasteca, con un total de 58 municipios. Con una población de 2,762,818 habitantes según el Censo de Población y Vivienda 2010, derivado del INEGI. La temperatura media anual del estado es de 21°C . Mientras que la precipitación media anual es de 950 mm, presentándose en los meses de junio a septiembre (INEGI, 2016).

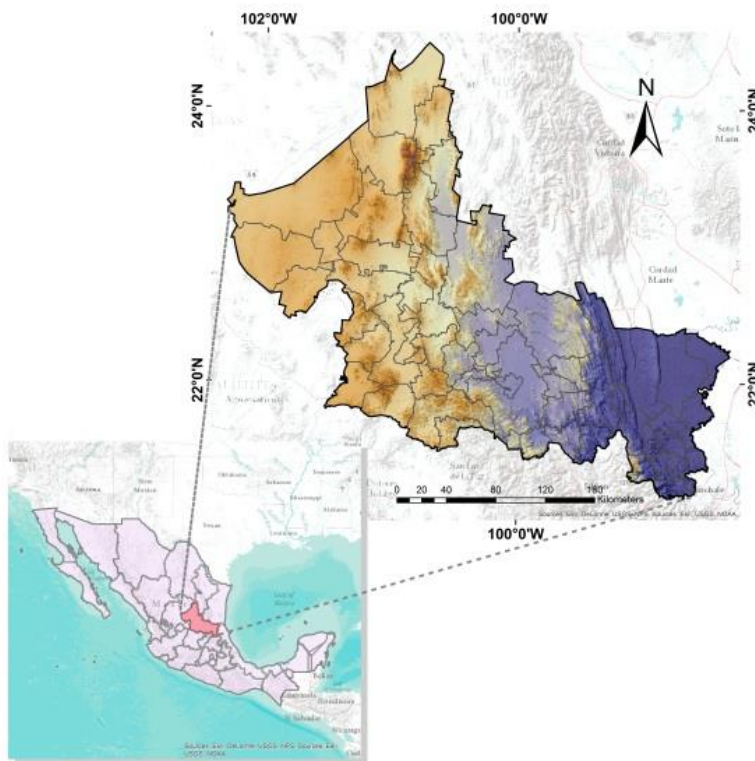


Figura 15. Localización del área de estudio.

El estado de San Luis Potosí se localiza en el centro de México. Está ubicado en la parte centro-norte del país y colinda con los estados de Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas y Zacatecas por el norte; Guanajuato, Hidalgo y Querétaro por el sur; Veracruz hacia el este, y Jalisco y parte del estado de Zacatecas, hacia el oeste. Cuenta con una superficie de 61,137 km². El Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2010) reporta que el clima es seco y semiseco, principalmente, con una temperatura media anual de 21 grados centígrados, y una precipitación anual promedio de 950 mm. Según la Encuesta Intercensal 2015 del INEGI (2016), la población total es de 2,717,820 personas, de las cuales el 51.5% son mujeres y el 48.5% son hombres.

San Luis Potosí es un territorio con una geografía altamente diferenciada; sus alturas varían entre los 20 y 2,680 m.s.n.m., de ahí que se divide en cuatro zonas naturales que contienen 58 municipios. Estas regiones son (I) la región del centro, que es la principal entidad industrial del estado, participa en el PIB regional con 81.4%, alberga a 49% de los habitantes de la región y emplea a 79% de los trabajadores; (II) la región del altiplano potosino, con alguna actividad industrial y un importante centro estratégico para el mercado de estados Unidos que produce 5.4% del PIB y alberga a 12.9% de la población; (III) la región media, que, aunque no cuenta con zonas industriales, tiene una gran cantidad de PYMEs, produce 4% del PIB y concentra 10.6% de la población; y (IV) la región huasteca que, ubicada en la planicie, aporta 9.2% del PIB y 27.8% de la población (OCDE, 2012).

3.4. Juegos de datos

Se obtuvieron datos meteorológicos (temperatura y precipitación) mensuales para los años 1990, 2000 y 2010. Derivados de un total de 200 estaciones ubicadas a lo largo del territorio potosino, proporcionados por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Para el año 2015 se tomaron datos de la red de estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). De igual manera, se contó con datos económicos estatales del Producto Interno Bruto (PIB), procedentes de la Secretaría de Desarrollo Económico de Gobierno del Estado de San Luis Potosí. Así como también información del volumen destinado de aguas nacionales por uso o actividad, proveniente de la CONAGUA. Por otra parte, se utilizaron imágenes satelitales de los sensores Landsat 5 TM y 8 OLI. Las cuales cuentan con un pixel de 30 metros de resolución.

Así mismo, para este estudio se utilizó información cartográfica vectorial del INEGI y relativa al Uso de Suelo en el Estado de San Luis Potosí, de manera a integrar y generar nuevas capas cartográficas de información a partir de datos satelitales del sensor Landsat 5 Thematic Mapper para los años 1990, 2000 Y 2010. Mientras que para el año 2015 se utilizaron datos del sensor Landsat 8 OLI. A este conjunto de imágenes se le aplicó una corrección radiométrica para obtener valores de radiancia, al igual que una corrección atmosférica para obtener valores de reflectancia superficial. Se realizó una clasificación supervisada con el algoritmo de Máxima Verosimilitud, de acuerdo a las siguientes clases: Cuerpo de agua, Tierras de cultivo, Zona urbana, Suelo desnudo, Bosque, Selva, Pastizal, Otro tipo de vegetación y Matorral. Finalmente se integraron las imágenes en un mosaico con una resolución espacial de 30 x 30 metros.

3.5. Determinación de variables

En este estudio, la determinación de variables consistió en el desarrollo de un análisis multitemporal (comprendido por los años 1990, 2000, 2010 y 2015) del Uso y Aprovechamiento del Agua en el Estado. Éste análisis se realizó mediante la aplicación de indicadores económicos y ecológicos, en este sentido, las variables adecuadas para el cálculo del Uso y Aprovechamiento del Agua son la Evapotranspiración Real, cartografía de uso de suelo e indicadores económicos (como el PIB), los cuales son necesarios para la estimación de parámetros ecológicos y económicos siendo de utilidad para explicar la manera en la que los recursos hídricos son utilizados. Además, se realizó una adecuación de metodologías propuestas (Huang et al., 2014; Smajgl et al., 2010) identificando la problemática en el Estado.

3.5.1. Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI)

Primero fue necesario determinar el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) mismo que está orientado hacia la estimación de agua líquida presente en la vegetación. Éste se define como $(\rho(0.86 \mu\text{m}) - \rho(1.24\mu\text{m})) / (\rho(0.86 \mu\text{m}) + \rho(1.24\mu\text{m}))$, donde ρ representa la radiancia en unidades de reflectancia. Por tanto el NDWI es sensible a los cambios de agua líquida en la vegetación (Gao, 1996).

A lo largo de los años este índice ha contado con distintos usos, como lo son: la estimación del contenido del agua para estimar la estructura del canopy (dosel) de la vegetación (Zarco-Tejada et al., 2003), Determinación de zonas inundables a partir del NDWI y Modelos Digitales del Terreno (Jain et al., 2005). Además, el NDWI está altamente correlacionado con el contenido de agua en la hoja (Jackson et al., 2004) y la humedad en el suelo (Fensholt y Sandholt, 2003).

El cálculo de la evapotranspiración (ET) a nivel de hoja, se ve afectado principalmente por la conductividad estomática, la cual es regulada por la intensidad de la radiación,

presión del vapor, contenido de agua en el suelo y concentraciones de CO₂. Mientras que la estimación de la evapotranspiración regional está relacionada con la estructura del dosel de la vegetación, humedad del suelo y la energía en la cima del dosel de la vegetación y la superficie del suelo. Por tanto el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI) nos proporciona información útil para el cálculo de la ET. Además de que la disponibilidad de agua en una región está muy relacionada con la evapotranspiración (Lu y Zhuang, 2010).

Este proceso fue necesario para comprender cómo se comportaba la humedad del suelo en el estado en los diferentes periodos temporales de análisis permitiendo análisis preliminares necesarios para calcular la evapotranspiración.

3.5.1.1. Procesamiento de imágenes satelitales Landsat 8 OLI para la obtención del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).

En primera instancia se obtuvieron las imágenes satelitales del sensor Landsat 8 OLI a través de su descarga en el sitio web del U.S. Geological Survey (USSG, por sus siglas en inglés) <http://glovis.usgs.gov/>. En la tabla 1, se muestran las fechas y productos descargados requeridos.

Temporada	Sensor	Fecha	Path/Row
Sequía	Landsat 8 OLI	marzo 2015	29 44
Sequía	Landsat 8 OLI	abril 2015	28 43
Sequía	Landsat 8 OLI	abril 2015	28 44
Sequía	Landsat 8 OLI	abril 2015	28 45
Sequía	Landsat 8 OLI	marzo 2015	27 44

Sequía	Landsat 8 OLI	marzo 2015	27 45
Lluvias	Landsat 8 OLI	agosto 2015	29 44
Lluvias	Landsat 8 OLI	agosto 2015	28 43
Lluvias	Landsat 8 OLI	julio 2015	28 44
Lluvias	Landsat 8 OLI	Julio 2015	28 45
Lluvias	Landsat 8 OLI	mayo 2015	27 44
Lluvias	Landsat 8 OLI	mayo 2015	27 45
Sequía/ Lluvias	Landsat 8 OLI	Agosto 2015	26 45

Tabla 1. Características las imágenes satelitales Landsat 8 Oli

La particularidad del sensor Landsat 8 OLI es el aumento en sus bandas siendo 11 las que componen la imagen, a las cuales se añadió una banda de azul costero, una banda calidad y 2 bandas térmicas. Con una resolución espacial de 30 metros y una mejor calidad espectral. Para tal proceso se utilizó la versión 5.1 del software Exelis Visual Information Solution (ENVI, por sus siglas en inglés) para el procesamiento de las imágenes satelitales. Este procesamiento consistió en correcciones radiométricas, atmosféricas, obtención del índice NDWI y clasificación mediante árbol de decisión.

3.5.1.2. Corrección radiométrica.

Una corrección radiométrica es una herramienta útil para reparar los valores del pixel que han sufrido un error debido a distintas situaciones, como pueden ser factores atmosféricos, fallas en el sensor, temporadas del año, etc. Una manera de corregir estos

erros es mediante la herramienta facilitada por el software ENVI para el sensor Landsat. La cual consiste en multiplicar valores del número digital o pixel por las ganancias que registra el sensor (dadas en w/m²) y sumarle las pérdidas del mismo, es decir:

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

En donde L_{λ} es la radiancia a obtener, $G_{rescale}$ son las ganancias de la banda, Q_{cal} es el número digital del pixel y $B_{rescale}$ son las pérdidas de la banda. Esta corrección se aplicó a cada imagen satelital para obtener valores de radiancia, los cuales son indispensables para el cálculo de valores de reflectancia superficial.

3.5.1.3. Corrección atmosférica.

Consiste en modificar los ND de tal manera que de estos se elimine el efecto atmosférico causado por diversos factores como la dispersión de partículas, además con este proceso se obtienen valores de reflectividad superficial.

Mediante el menú principal de ENVI en Spectral – FLAASH se accedió al método de la corrección llenando así los espacios con los metadatos de la imagen como lo son;

- Coordenadas centrales de la imagen
- Tipo de sensor (MSS), altitud, tamaño del pixel
- Elevación del suelo (esta se obtiene del modelo digital del terreno al cual se le enmascara el valor negativo de -32768 para de esta manera aplicar la fórmula $((\text{float}(b1) \text{ lt } 0) * 0) + ((\text{float}(b1) \text{ gt } 0) * \text{float}(b1))$ y eliminar los valores negativos del modelo. Con esto realizado se obtienen las estadísticas y la media indicará la elevación del terreno en metros).
- Fecha y tiempo de adquisición

- Datos atmosféricos.

Completado el paso anterior se procede a crear el archivo de corrección atmosférica el cual los ND se obtendrán como valores en una escala de 100 a 10000.

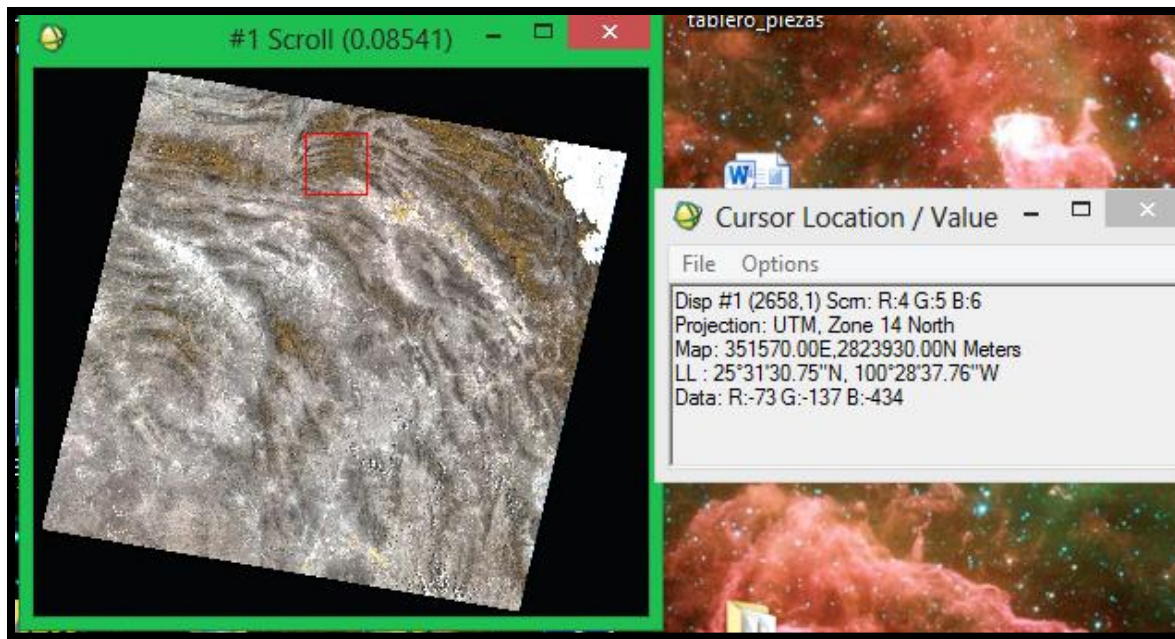


Imagen 16. Parámetros de corrección bajo el modelo FLAASH.

El último paso para obtener la imagen con valores de reflectividad y corrección atmosférica consistió en escalar los valores de reflectancia a valores comprendidos entre 0 y 1 mediante la siguiente fórmula: $((\text{float}(b1) \leq 0) * 0) + ((\text{float}(b1) \geq 10000) * 1) + (((\text{float}(b1) > 0) \text{ and } (\text{float}(b1) < 10000)) * (\text{float}(b1) / 10000))$. Esto arrojó como resultado una imagen con valores de reflectividad superficial normalizados a una escala del 0 al 1 en unidades de watts por metro cuadrado.

3.5.1.4. Cálculo del Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI).

El índice diferencial de agua normalizado o NDWI (Normalized Difference Water Index) se utiliza como una medida de la cantidad de agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo. Generalmente se calcula a partir de imágenes satelitales que brindan información de reflectancia de una determinada zona en diferentes bandas de frecuencia del espectro electromagnético. Tiene uso extendido en ciencias ambientales e hídricas, ya que brinda información relevante para utilizar en modelos de balance hídricos, predicción climática entre otros.

El cálculo se realiza operando matemáticamente sobre los valores de reflectancia de las diferentes bandas del espectro electromagnético:

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

donde NIR (Near InfraRed) es el valor en la banda del infrarrojo cercano, y SWIR (ShortWavelength InfraRed) del infrarrojo corto (porción del infrarrojo medio). Las bandas correspondientes en el sensor Landsat 8 OLI son las bandas 5 y 6, respectivamente. De dicho proceso resultaron los siguientes análisis espaciales de dicho índice en las diferentes épocas del estudio, de lo cual se obtuvieron mosaicos de imágenes satelitales que cubren el estado de San Luis Potosí. Estos mosaicos contienen valores de nivel de saturación de humedad en el suelo. En la figura siguiente 1 podemos observar el NDWI de la temporada de lluvias (en los meses de julio a septiembre) para los años 1990, 2000, 2010 y 2015. Los niveles de mayor humedad en el suelo se encuentran en la región huasteca del estado con pequeñas concentraciones en la región media y centro.

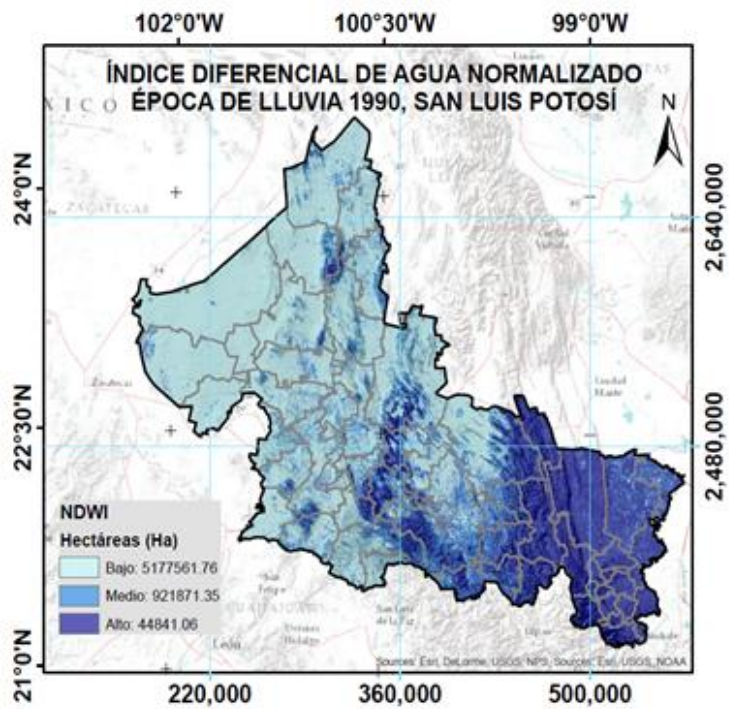


Figura 18. NDWI para época de lluvia 1990.

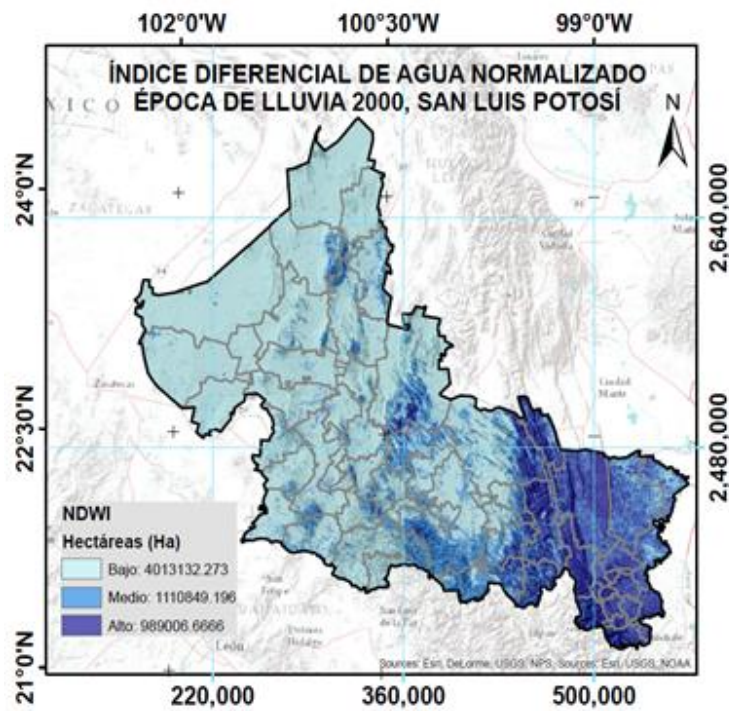


Figura 19. NDWI para época de lluvia 2000.

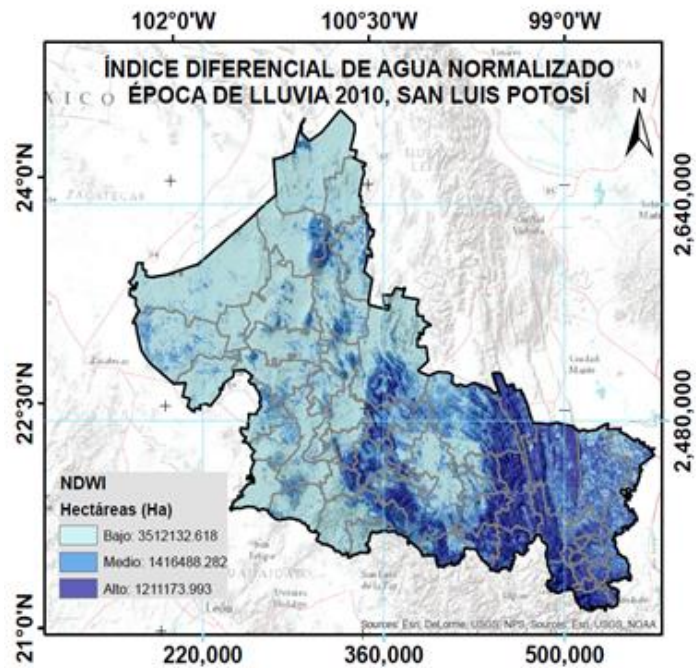


Figura 20. NDWI para época de lluvia 2010..

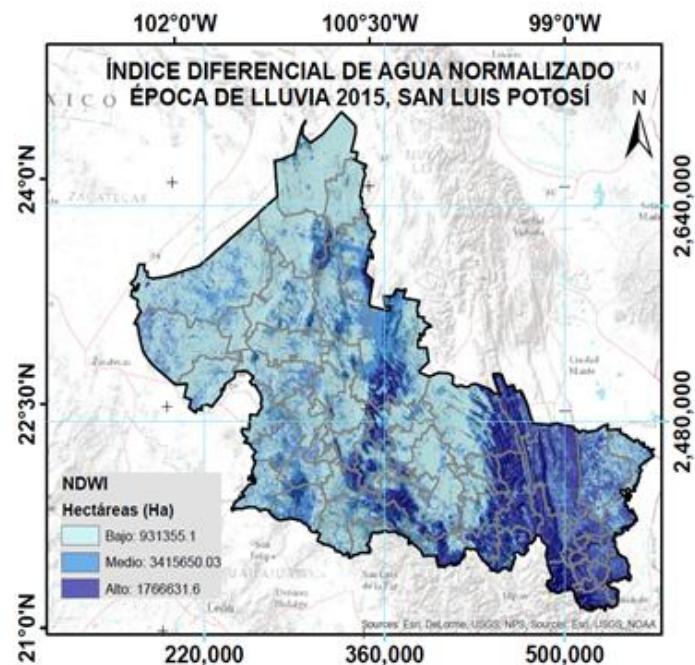


Figura 21. NDWI para época de lluvia 2015.

NDWI calculado para la época de sequías (en los meses de marzo a mayo) para el estado de San Luis Potosí en los mismos años 1990, 2000, 2010 y 2015. Se puede observar que la humedad registrada que posee la vegetación en las regiones media y centro del estado ha disminuido considerablemente. Así mismo en la región huasteca del estado que aunque se contienen las mayores concentraciones de humedad también se registró una disminución considerable.

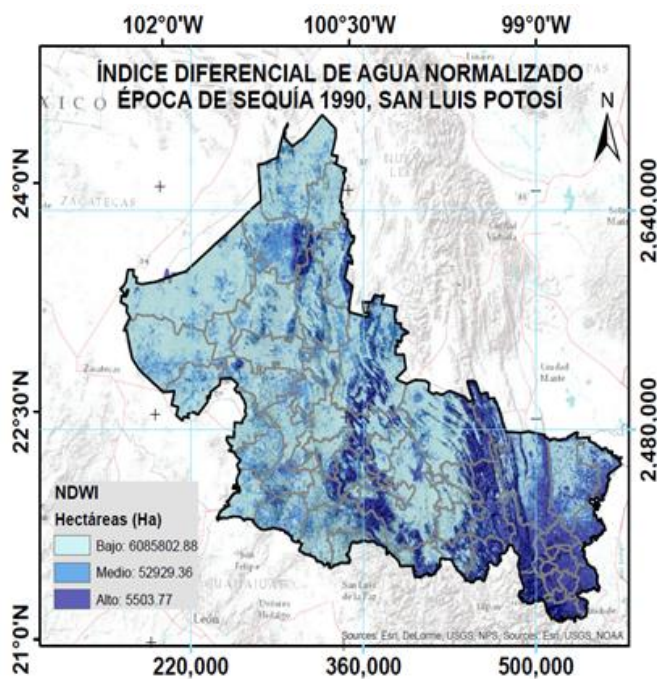


Figura 22. NDWI para época de sequía 1990.

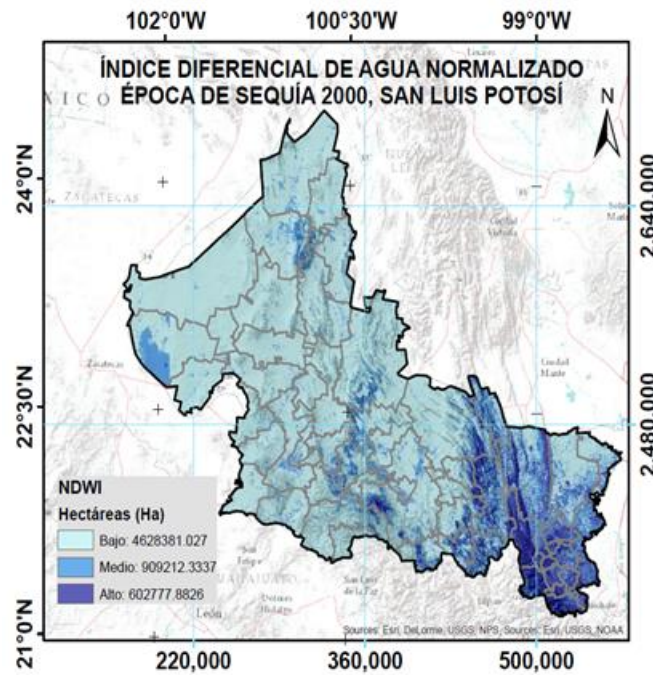


Figura 23. NDWI para época de sequía 2000.

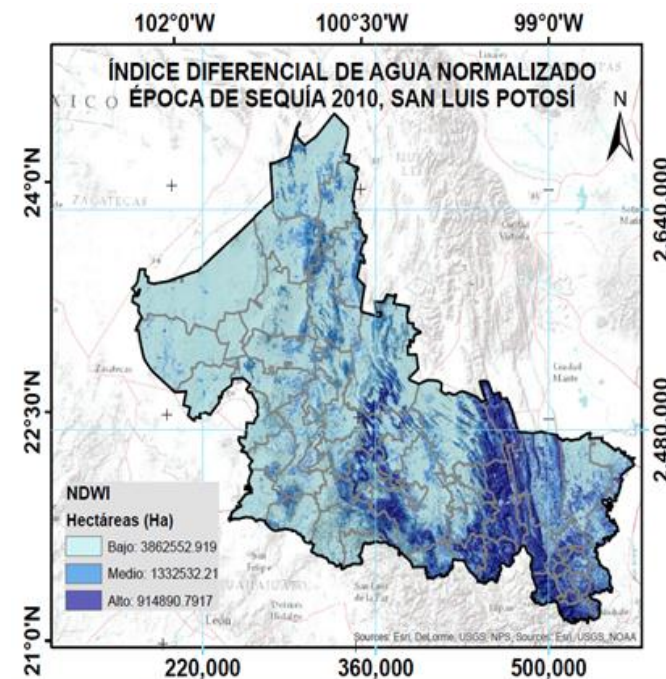


Figura 24. NDWI para época de sequía 2010.

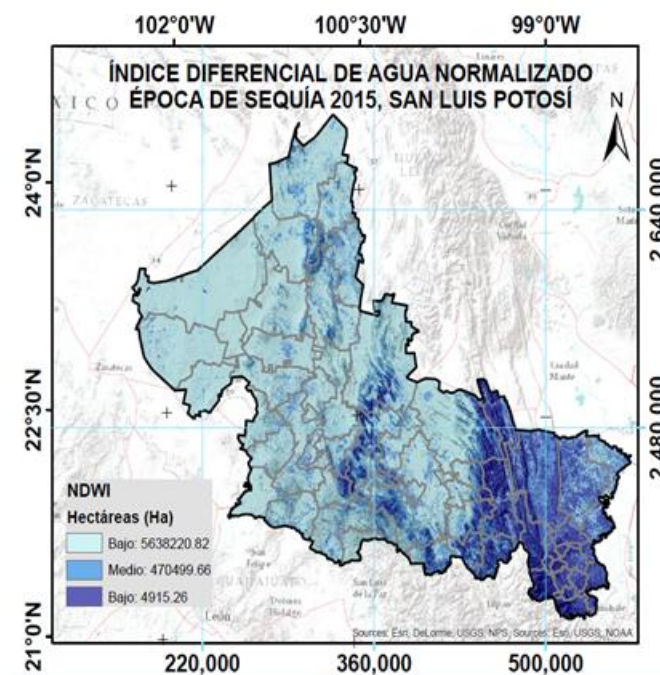


Figura 25. NDWI para época de sequía 2015.

3.5.2. Evaluación de la evapotranspiración a través de métodos geoestadísticos

El cálculo de la evapotranspiración se estimó para las temporadas de sequía y lluvias en el estado. De 200 estaciones meteorológicas se obtuvieron datos mensuales de precipitación y temperatura. Para la estimación de la evapotranspiración se aplicó el método de Turc, el cual, relaciona la precipitación y la temperatura para la obtención de la Evapotranspiración Real (ETR), en donde, el cálculo de la ETR se rige bajo el principio de condiciones reales y teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa. En este estudio, la ETR se asocia con el consumo total de agua generado en una región. Por consiguiente la ETR se calcula como:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

donde ETR corresponde al cálculo de la Evapotranspiración, P es igual a la precipitación registrada (mm/año), el parámetro L que depende de la Temperatura media anual ($^{\circ}\text{C}$) T y se calcula como $L=300+25T+0.05T^3$. Con base a estos cálculos realizados para cada estación, se llevó a cabo un análisis geoestadístico. Aplicando métodos de interpolación como Kriging simple para generar una superficie continua de valores estimados de ETR, finalmente se obtuvo una simulación Gaussiana del comportamiento de la evapotranspiración a lo largo del territorio del Estado de San Luis Potosí. Con un tamaño de celda de 30 X 30 metros.

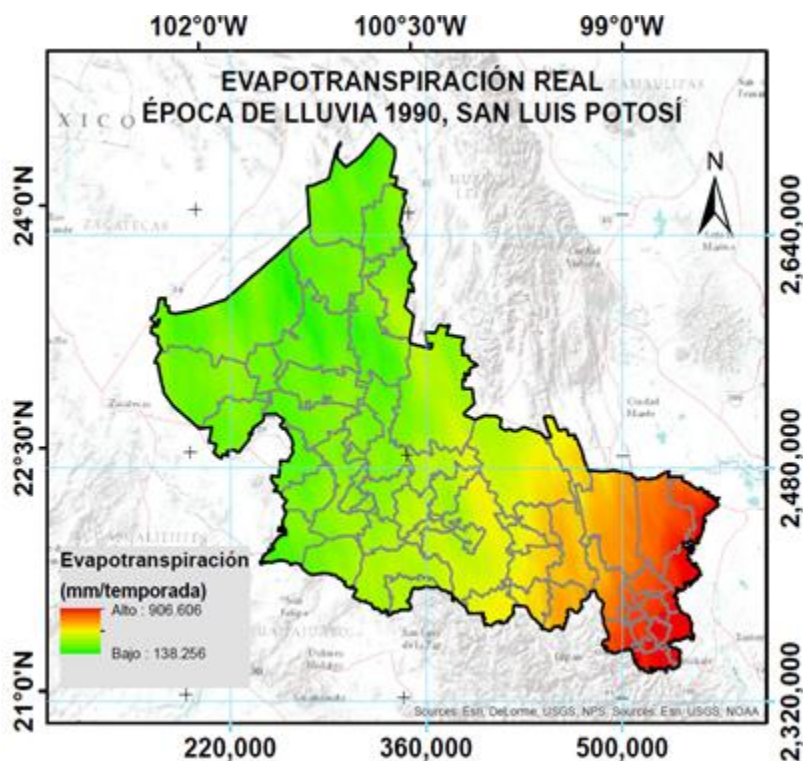


Figura 26. NDWI para época de lluvia 1990.

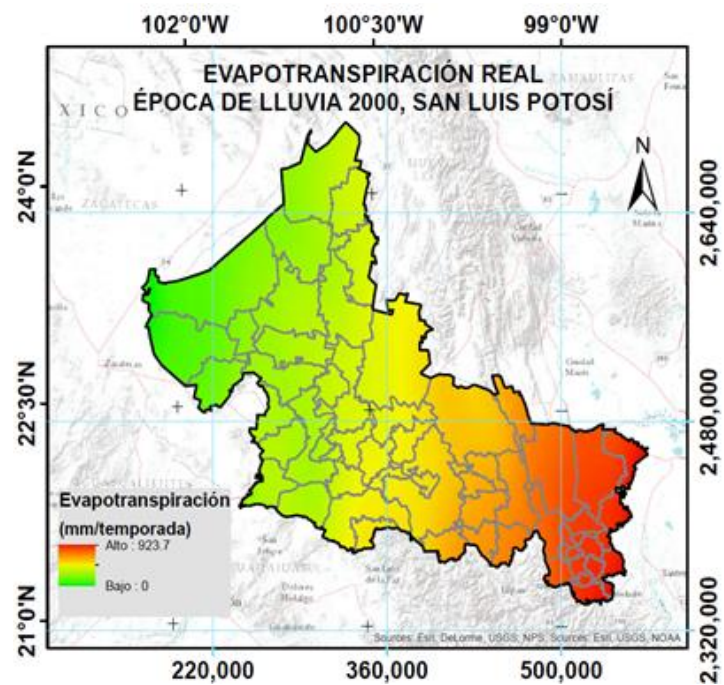


Figura 27. NDWI para época de lluvia 2000.

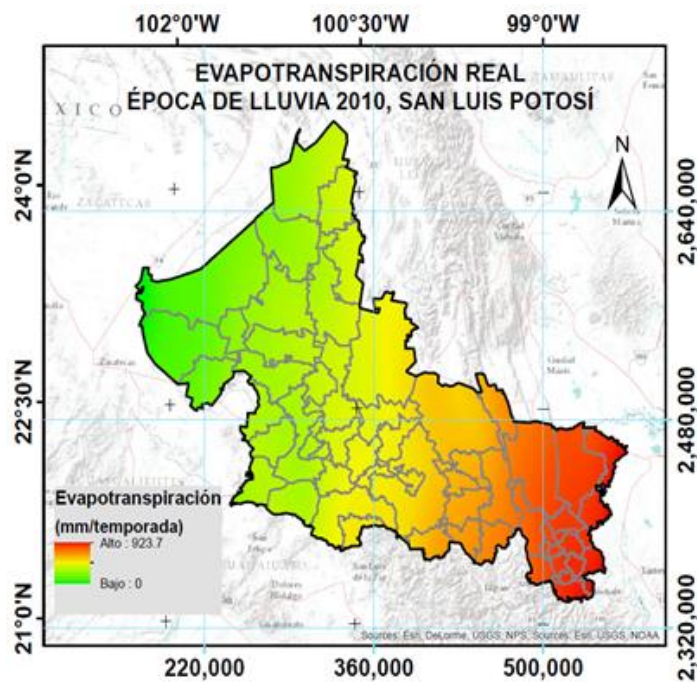


Figura 28. NDWI para época de lluvia 2010.

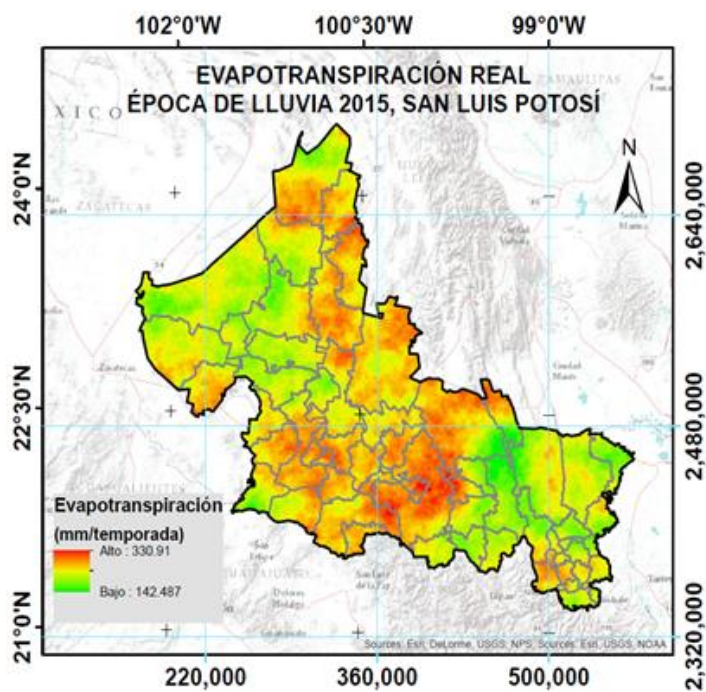


Figura 29. NDWI para época de lluvia 2015.

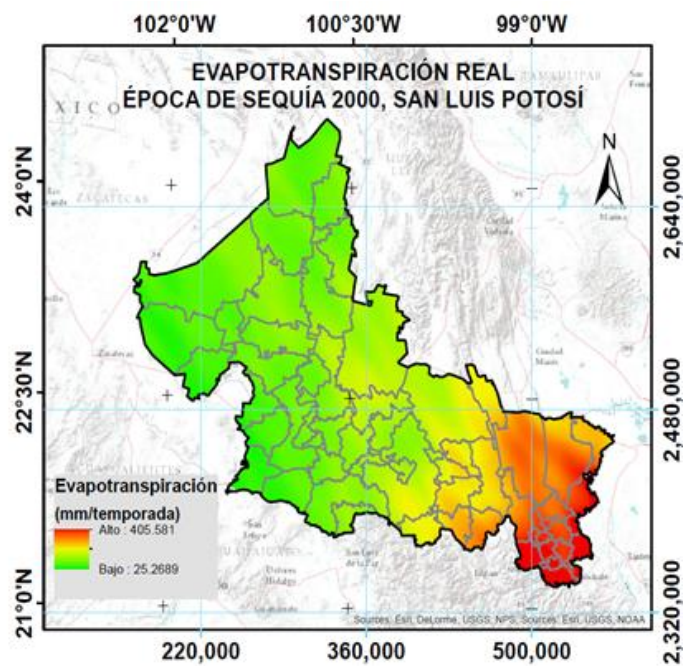


Figura 31. NDWI para época de sequía 2000.

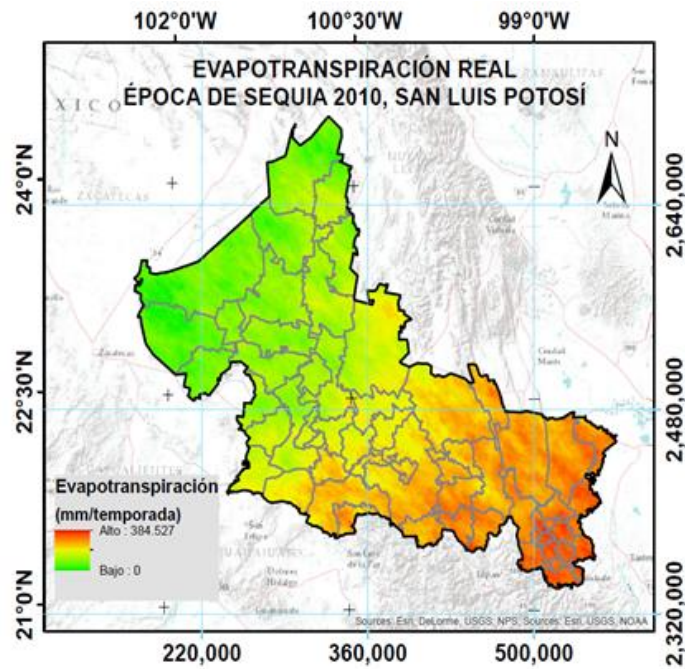


Figura 32. NDWI para época de sequía 2010.

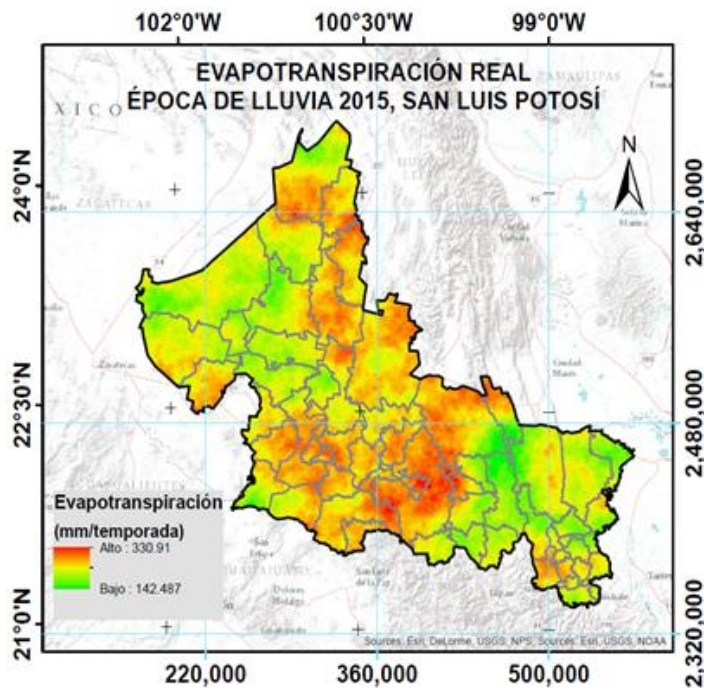


Figura 33. NDWI para época de sequía 2015.

3.5.3. Distribución espacial para determinar el PIB

El PIB es el valor monetario de los bienes y servicios finales producidos por una economía en un período determinado, es un indicador representativo que ayuda a medir el crecimiento o decrecimiento de la producción de bienes y servicios de las empresas en cada país. De igual manera, cada estado del país cuenta con este indicador. Para el estado de San Luis Potosí, se tomó el valor en millones de pesos y se distribuyó de acuerdo a las actividades económicas que define el INEGI (tabla 1), teniendo en cuenta las actividades económicas que se llevan a cabo por cada región de San Luis Potosí y el porcentaje de contribución al indicador estatal. La distribución espacial del PIB se calculó mediante técnicas geoestadísticas como son Kriging y Simulación Gaussiana, a partir de la siguiente ecuación:

$$PIB = PIB_{pri} + PIB_{sec} + PIB_{ter}$$

donde el PIB corresponde a la distribución espacial económica anual, PIB_{pri} se refiere a la distribución espacial de las actividades primarias en el estado, PIB_{sec} es la distribución espacial de las actividades secundarias en el estado y PIB_{ter} indica la distribución espacial de las actividades terciarias de San Luis Potosí.

Por último se relacionó la distribución espacial del PIB con el tipo de uso de suelo en el estado mediante la ecuación:

$$PIB = (PIB * A_{us})$$

donde la distribución espacial del PIB será el resultado de multiplicar el producto del indicador económico PIB por el área por uso de suelo A_{us} (Km^2).

Actividades Económicas en México

Actividades Primarias

Agricultura, cría y explotación de animales, aprovechamiento forestal, pesca y caza

Actividades Secundarias

Minería

Generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, suministro de agua y de gas por ductos al consumidor final

Construcción

Industrias manufactureras

Actividades Terciarias

Comercio

Transportes, correos y almacenamiento

Información en medios masivos

Servicios financieros y de seguros

Serv. inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles

Servicios profesionales, científicos y técnicos

Corporativos

Servicios de apoyo a negocios y manejo de desechos y servicios de remediación

Servicios educativos

Servicios de salud y de asistencia social

Servicios de esparcimiento culturales y deportivos, y otros servicios recreativos

Hoteles y restaurantes

Otros servicios excepto actividades del gobierno

Actividades del gobierno

Tabla 2. Clasificación INEGI de las actividades económicas.

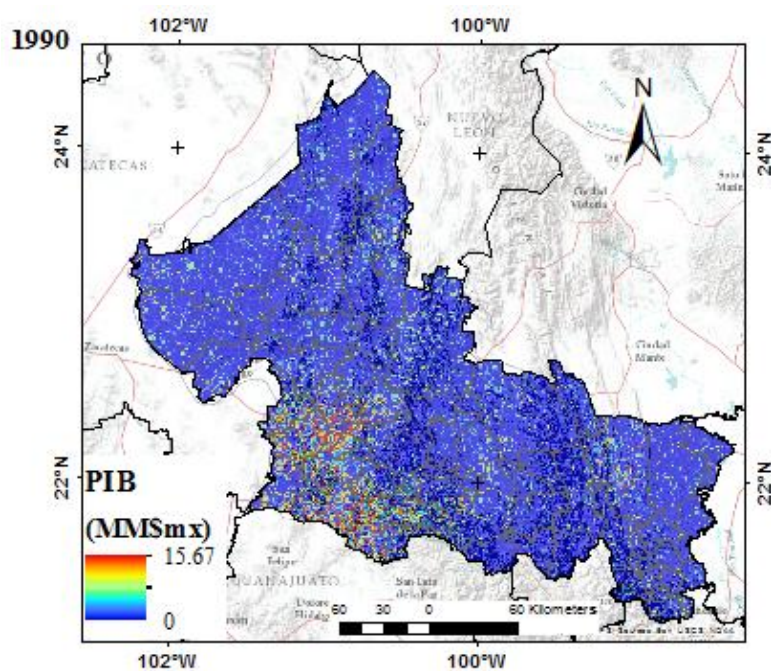


Figura 34. PIB espacialmente distribuido.

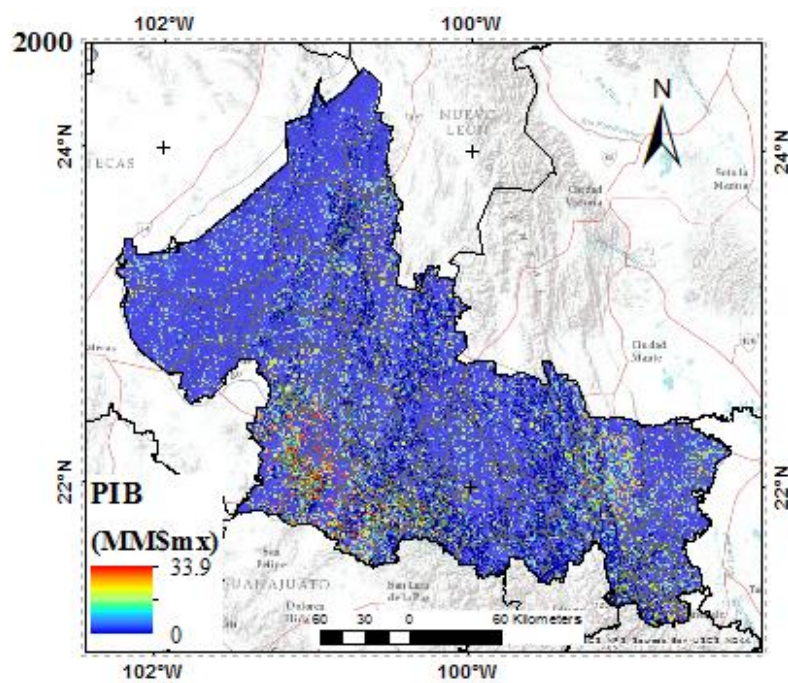


Figura 35. PIB espacialmente distribuido 2000.

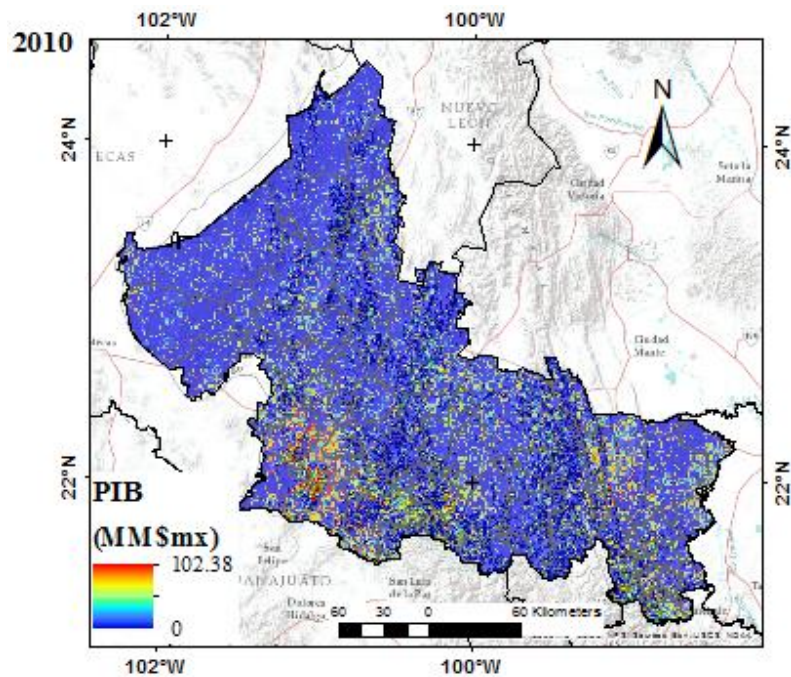


Figura 36. PIB espacialmente distribuid 2010.

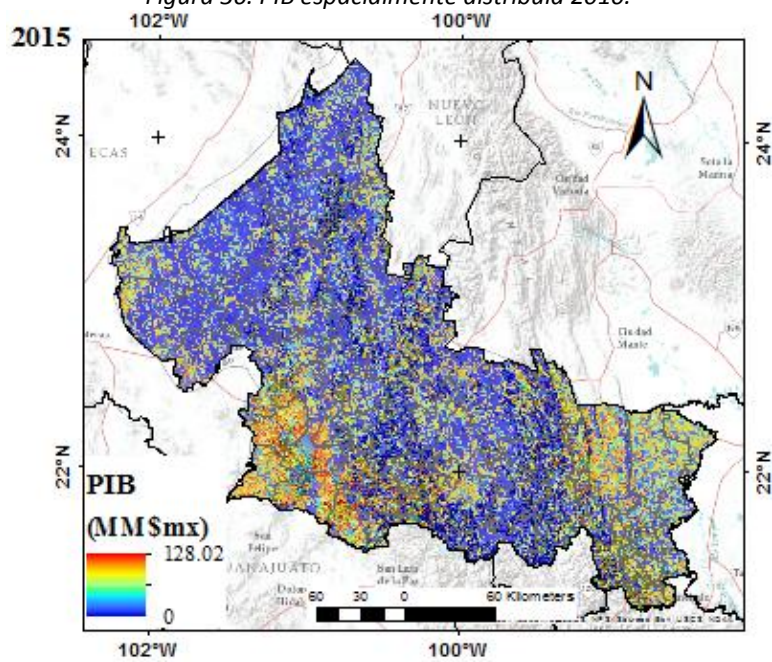


Figura 37. PIB espacialmente distribuido 2015.

3.5.4. Evaluación de la distribución espacial del valor del servicio ambiental a través de imágenes de satélite (determinar ESV)

El Valor del Servicio Ambiental (VSA) son los beneficios que traen consigo los organismos vivos, los cuales ayudan a mantener el sistema de vida en la Tierra. En este caso, se describe el VSA como la cantidad de aguas nacionales destinada a los distintos tipos de actividades que requieren de su consumo. Este indicador se define como la sumatoria del producto entre el área por tipo de uso de suelo y el volumen de agua destinado al uso de suelo:

$$VSA = \sum A_{us} * V_a$$

donde VSA es el valor del Servicio Ambiental, A_{us} corresponde al área en Km^2 por tipo uso de suelo en el Estado y V_a es el volumen de agua destinado por uso u actividad desarrollada en San Luis Potosí.

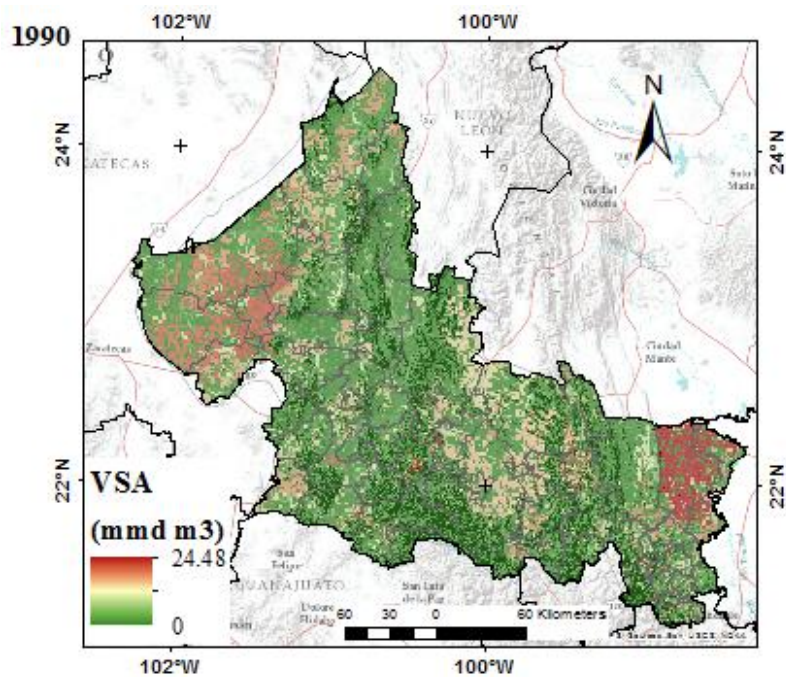


Figura 38. VSA espacialmente distribuido 1990.

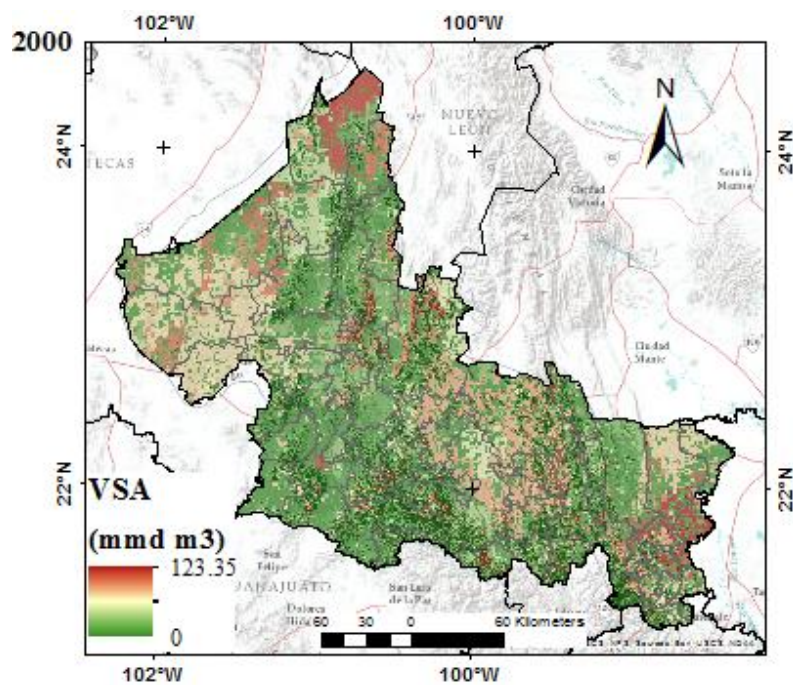


Figura 39. VSA espacialmente distribuido 2000.

3.5.5. Cartografía de uso de suelo

La cartografía de uso de suelo en el estado de San Luis Potosí se realizó a partir de datos satelitales del sensor Landsat 5 Thematic Mapper para los años 1990, 2000 Y 2010, mientras que para el año 2015 se utilizaron datos del sensor Landsat 8 OLI. A este conjunto de imágenes se le realizó una corrección radiométrica para obtener valores de radiancia, por otra parte, se eliminó el efecto de la atmósfera sobre la imagen, aplicando el algoritmo Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes (FLAASH) que permitió reducir la radiancia añadida a los píxeles de cada banda por el efecto de niebla para obtener valores de reflectancia superficial y corregir los efectos atmosféricos que alteran el valor de cada píxel. En seguida, se realizó una clasificación supervisada con el algoritmo de Máxima Verosimilitud, de acuerdo a las siguientes clases: cuerpos de agua, tierras de cultivo, zona urbana, suelo desnudo, bosque, selva, pastizal, otro tipo de vegetación y matorral. El algoritmo para la clasificación de máxima verosimilitud se basa en dos principios: (1) las celdas en cada muestra de clases del espacio multidimensional que se distribuyen normalmente y (2) el teorema de Bayes de toma de decisiones. Considera las varianzas y covarianzas de las firmas de clases cuando asigna cada celda a una de las clases representadas en el archivo de firma. Si se asume que la distribución de una muestra de clases es normal, una clase puede estar caracterizada por el vector del valor medio y la matriz de covarianza. Dadas estas dos características para cada valor de celda, se calcula la probabilidad estadística para cada clase a fin de determinar la pertenencia de las celdas a la clase.

Cuando se realiza una clasificación de máxima verosimilitud, también se puede producir un ráster de confianza de salida opcional. Este ráster muestra los niveles de confianza de la clasificación. La cantidad de niveles de confianza es 14, que se relaciona directamente con la cantidad de valores de fracción de rechazo válidos. El primer nivel de confianza, codificado en el ráster de confianza como 1, comprende celdas con la menor distancia hasta cualquier vector de valor medio almacenado en el archivo de firma de entrada; por lo tanto, la clasificación de estas celdas tiene una mayor certeza. Las celdas que constituyen el segundo nivel de confianza (valor de celda 2 en el ráster de confianza) se

clasificarán sólo si la fracción de rechazo es 0,99 o menor. El nivel de confianza más bajo tiene un valor de 14 en el ráster de confianza y muestra las celdas que posiblemente estén mal clasificadas. Las celdas de este nivel no se clasifican cuando la fracción de rechazo sea 0,005 o mayor. Finalmente se integran las imágenes en un mosaico que cubre todo el estado con una resolución espacial de 30 x 30 metros.

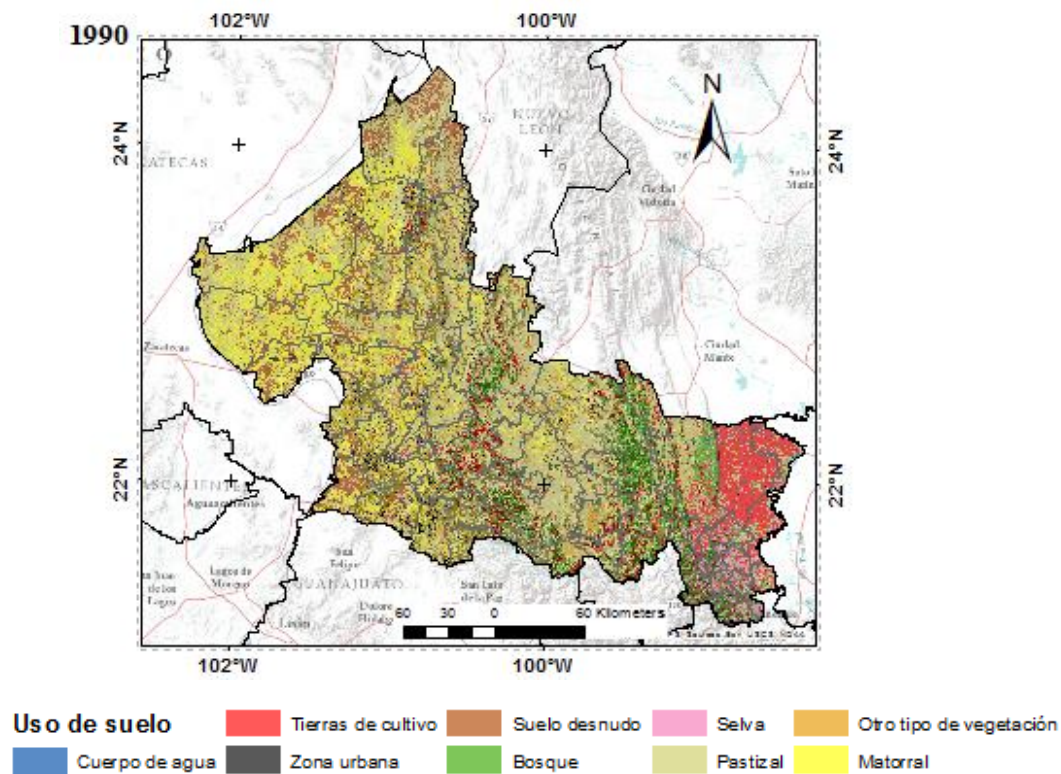


Figura 42. Uso del suelo espacialmente distribuido 1990.

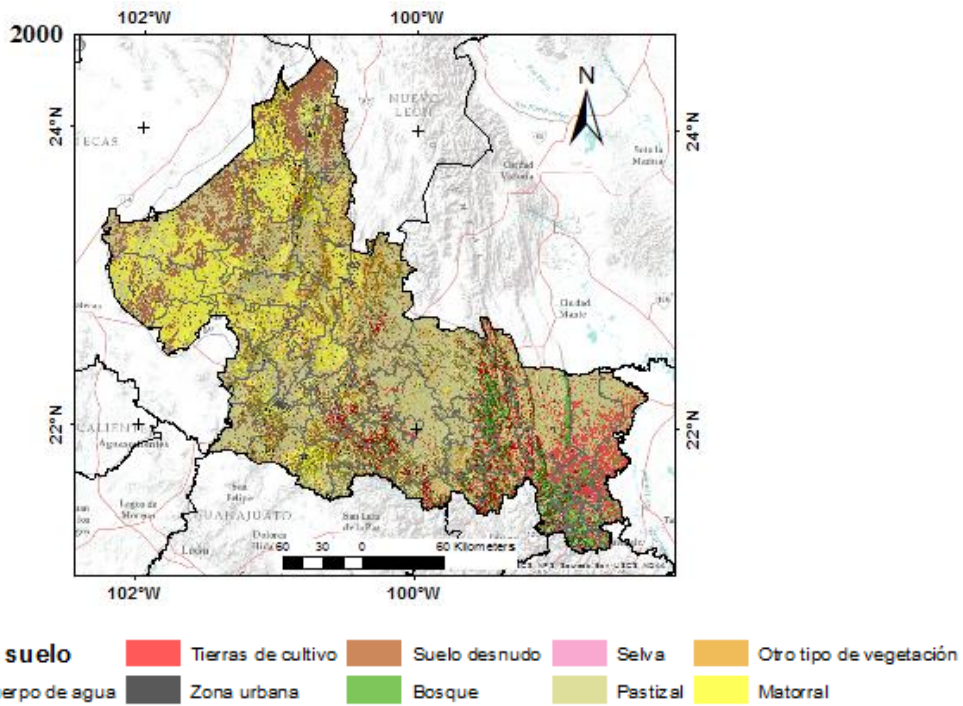


Figura 43. Uso del suelo espacialmente distribuido 2000.

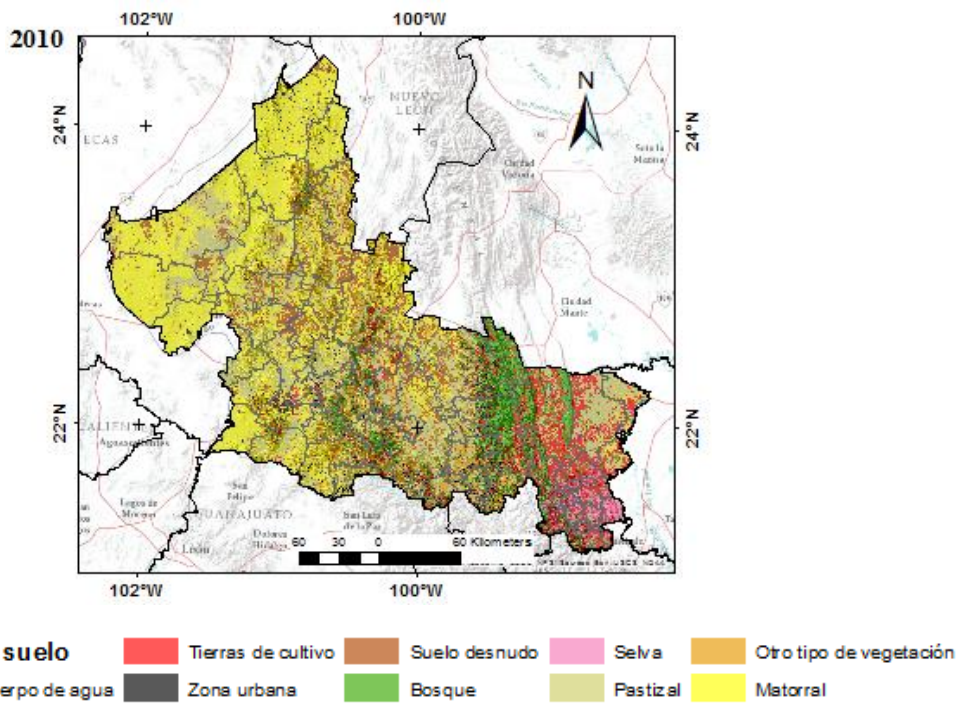


Figura 44. Uso del suelo espacialmente distribuido 2010.

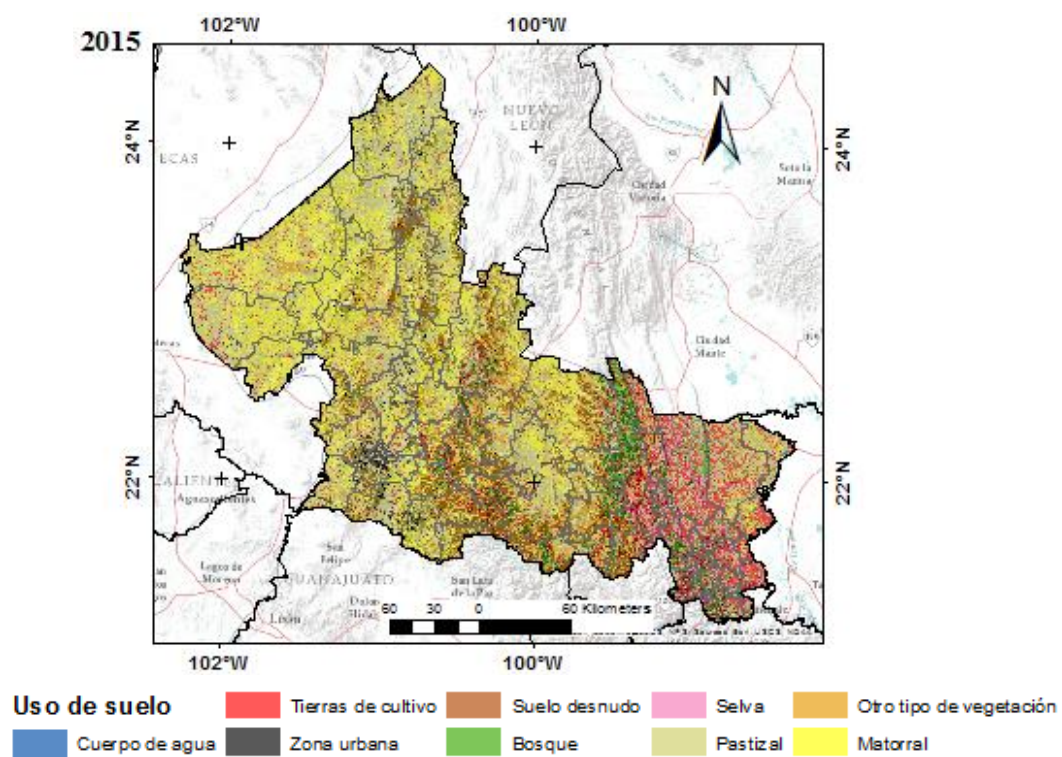


Figura 45. Uso del suelo espacialmente distribuido 2015.

3.6. Distribución espacial del uso y aprovechamiento del agua (UAA)

El Uso y Aprovechamiento del Agua (UAA) se define como los beneficios o aprovechamientos de la humanidad a través del consumo de agua dentro de un sistema ecológico y socioeconómico. Usualmente el UAA se clasifica en tres categorías, el aprovechamiento económico, el aprovechamiento social y el aprovechamiento ecológico. Este índice es importante para ayudar a la toma de decisiones a los responsables políticos, las organizaciones ambientales y los profesionales en el cuidado del agua. Por tal motivo y debido al crecimiento de la población, el deterioro del suelo, la mala calidad en el agua y su agotamiento futuro, este índice es una propuesta para el manejo sustentable de los recursos hídricos y por consiguiente para asegurar un sano desarrollo en la sociedad.

3.6.1. Uso y Aprovechamiento del Agua Económico (UAA *económico*)

El UAA *económico* es un índice basado en un censo económico anual, en este caso, se deriva de datos obtenidos del Producto Interno Bruto (PIB) para el estado de San Luis Potosí. Estos datos se clasificaron por actividad económica, es decir, las actividades primarias, secundarias y terciarias. Por medio de las cuales se calculó su distribución espacial mediante técnicas geoestadísticas dentro del periodo temporal a estudiar (1990, 2000, 2010 y 2015). Finalmente el mapa de distribución anual del PIB estatal se calcula mediante la suma de las tres clasificaciones por actividad económica:

$$PIB = PIB_{pri} + PIB_{sec} + PIB_{ter}$$

Dónde: PIB corresponde a la distribución espacial económica anual, PIB_{pri} se refiere a la distribución espacial de las actividades primarias en el estado, PIB_{sec} es la distribución

espacial de las actividades secundarias en el estado y PIB_{ter} indica la distribución espacial de las actividades terciarias de San Luis Potosí.

Por consiguiente, el $UAA_{económico}$ se obtiene de la siguiente manera:

$$UAA_{económico} = \frac{PIB}{ETR}$$

Dónde $UAA_{económico}$ es la distribución espacial del Uso y Aprovechamiento del Agua Económico, PIB corresponde a la a la distribución espacial económica anual y ETR es la distribución espacial de la evapotranspiración real anual.

3.6.2 Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico (UAA ecológico)

El $UAA_{ecológico}$ se determina a partir de la estimación del Valor del Servicio Ambiental (VSA), indicador ecológico que se refiere a los organismos vivos que derivan de las funciones del ecosistema que mantienen el sistema de la vida en la Tierra. De esta manera definimos que el VSA será la relación que existe con los diferentes usos de suelo en el estado de San Luis Potosí y la cantidad de extracción de aguas nacionales en el estado, es decir, la demanda de agua por uso (agrícola, agroindustrial, doméstico, etc.). Con esto se obtiene la distribución del valor (en m³/año) del servicio ambiental o la demanda de agua que se genera en el estado por los distintos usos que se le da al agua. Con base a la distribución espacial del VSA, se obtendrá el indicador del Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico ($UAA_{ecológico}$). El cual se define como:

$$UAA_{ecológico} = \frac{VSA}{ETR}$$

Dónde: $UAA_{ecológico}$ es el Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico, VSA es el Valor del Servicio Ambiental y ETR es la distribución espacial de la evapotranspiración real. De esta manera se obtendrá un indicador que muestre si la demanda y extracción de agua en el estado de San Luis Potosí corresponde al total de consumo de agua el cual se asocia a la evapotranspiración.

3.6.3 Resultados del cálculo del UAA Económico

El cálculo del UAA económico (figura 6), derivado de la distribución espacial del PIB y la estimación de la evapotranspiración real en el Estado, muestra el comportamiento del manejo del agua en San Luis Potosí dentro de un sector económico. Se puede observar que hay una gran variabilidad a lo largo del territorio y el tiempo. El indicador muestra que en las zonas urbanas es donde se encuentran los valores más altos en el periodo de 1990 al 2015, esto debido a que en estas áreas se concentra el desarrollo de las actividades económicas terciarias y secundarias. Para el estado de San Luis Potosí se observó que las actividades terciarias aportan una gran cantidad de recursos monetarios que produce el estado. Sin embargo, las actividades secundarias también son grandes aportadores a los bienes producidos por el Estado. Para las actividades primarias (agricultura, ganadería y pesca) se observa que en los años 1990, 2000 y 2010 el UUA económico se mantiene con niveles bajos, sin embargo, en el año 2015 incrementa el valor del UAA en las áreas que pertenecen al sector agrícola.

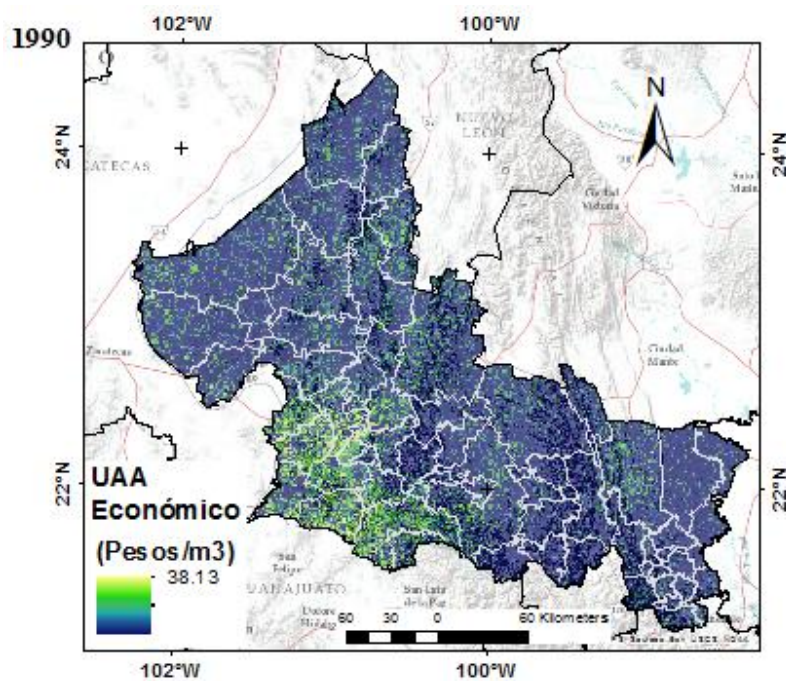


Figura 46. UAA Económico espacialmente distribuido.

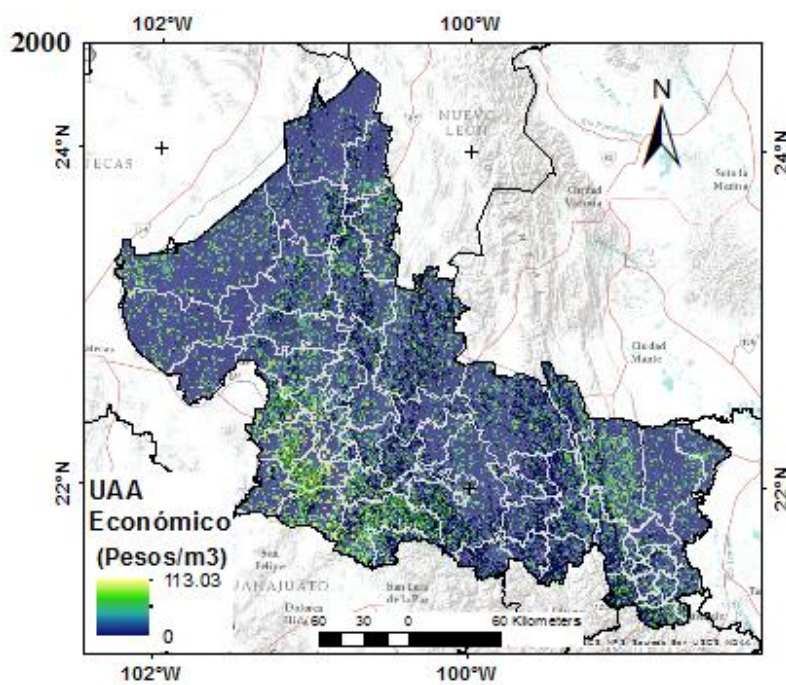


Figura 47. UAA Económico espacialmente distribuido 2000.

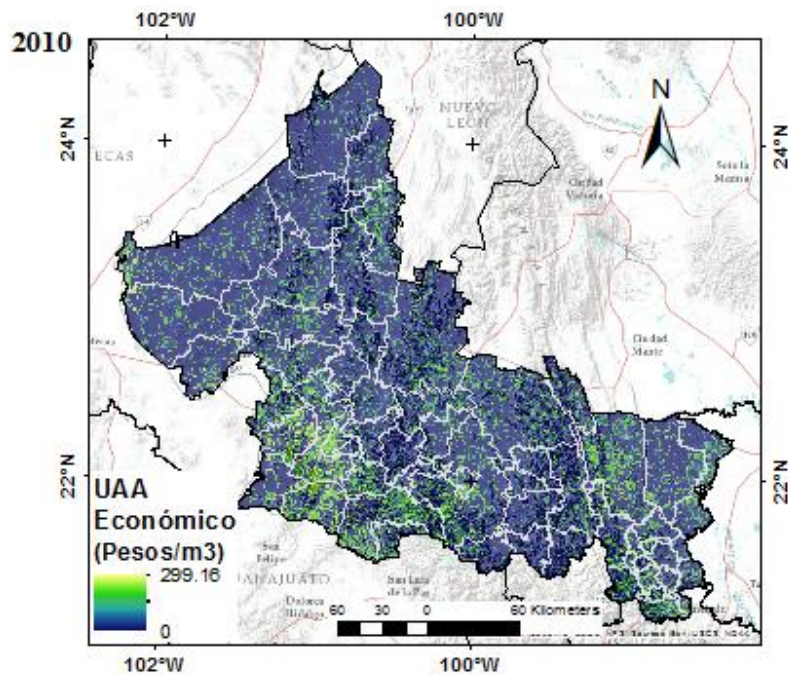


Figura 48. UAA Económico espacialmente distribuido.

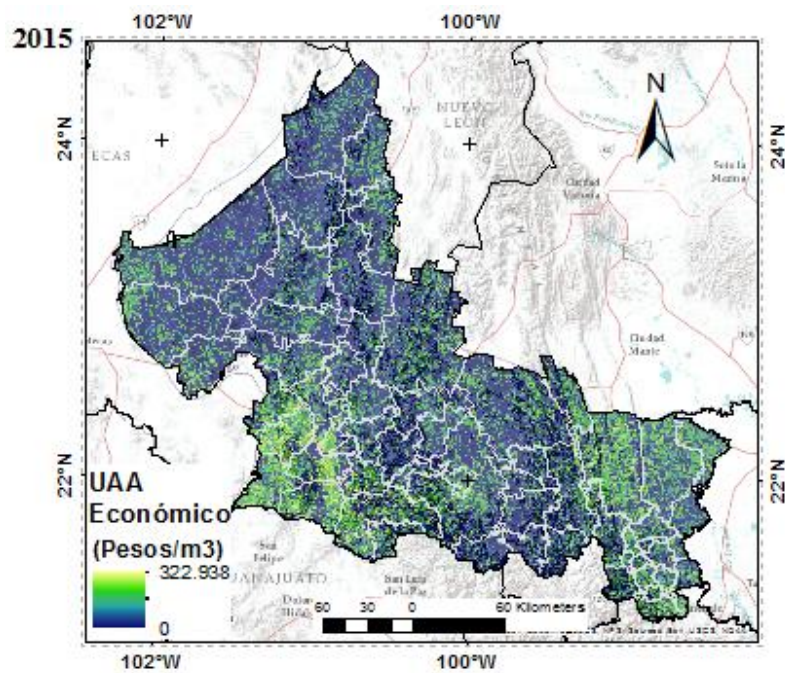


Figura 49. UAA Económico espacialmente distribuido 2015.

3.6.4. Resultados del cálculo del UAA Ecológico

El Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico fue calculado a partir de la estimación ETR anual y el Valor del Servicio Ambiental (figura 7). Para este trabajo, el UUA Ecológico Tiene un comportamiento similar a lo largo del periodo multitemporal. Es decir, los valores más altos del indicador se encuentran en las zonas urbanas, al igual que en el UAA Económico. Sin embargo, también hay valores altos en los usos de suelo que pertenecen a las tierras de cultivo.

También se observa que conforme pasa el tiempo los valores del UAA incrementan. Esto puede ser causado por el crecimiento poblacional y la mayor demanda de agua en el Estado, al igual que crecimiento de las zonas urbanas.

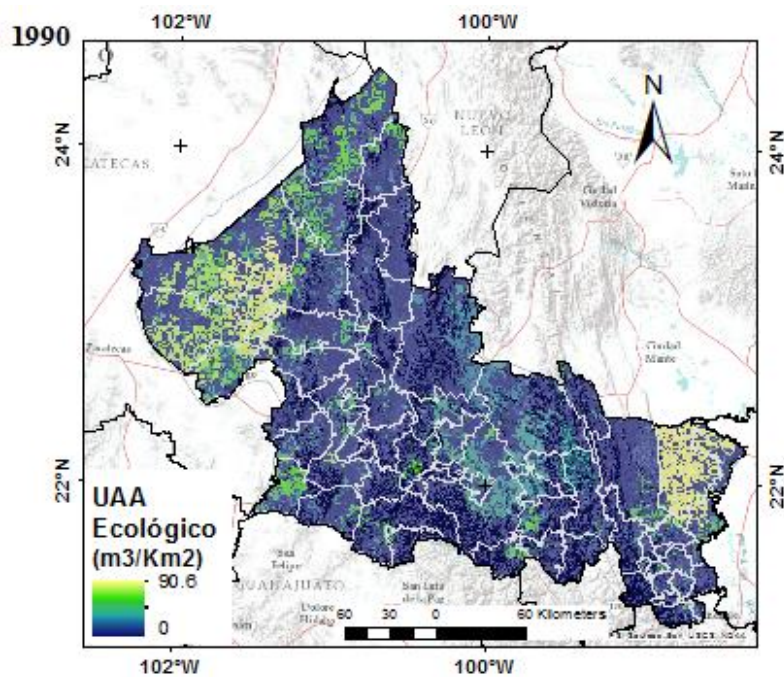


Figura 50. UAA Ecológico espacialmente distribuido 1990.

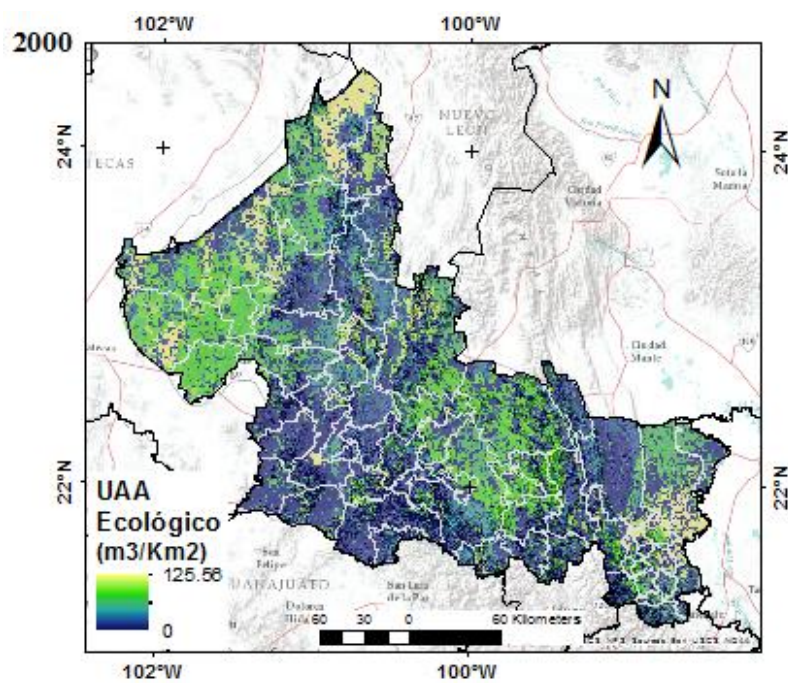


Figura 51. UAA Económico espacialmente distribuido 2000.

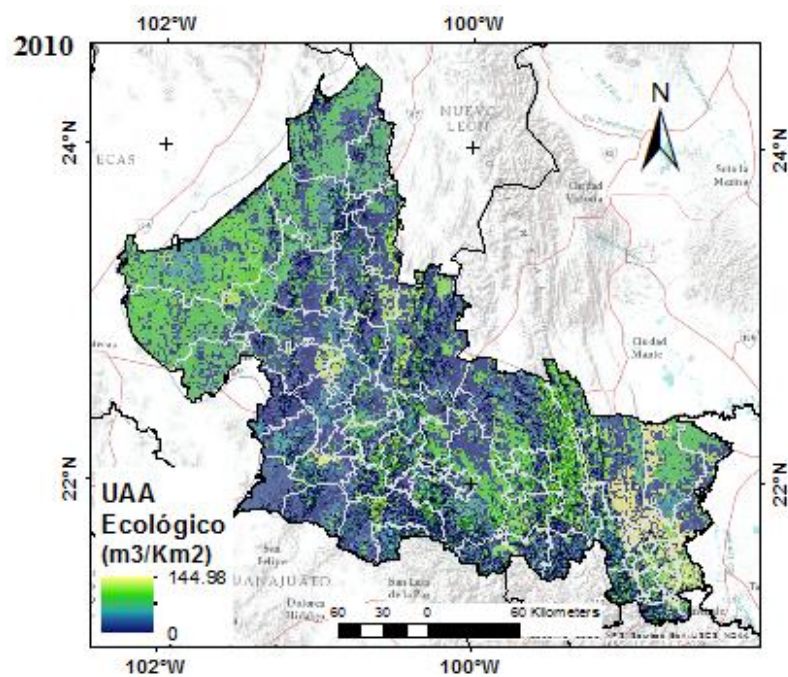


Figura 52. UAA Ecológico espacialmente distribuido 2010.

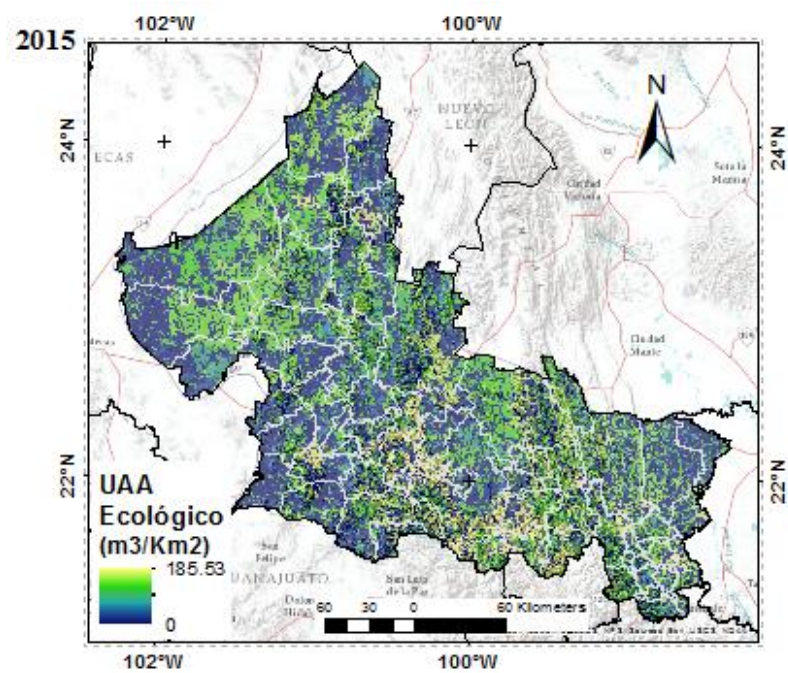


Figura 53. UAA Económico espacialmente distribuido 2015.

3.7. Modelo de distribución espacial

Las series de tiempo son un área importante de la predicción, en donde se tienen observaciones del pasado de una sola variable y a partir de su análisis se puede desarrollar un modelo que describa su relación básica. Una vez que se entiende su comportamiento a través del tiempo, es posible proyectar la serie temporal hacia el futuro. La aplicación de las series de tiempo es de gran ayuda cuando se cuenta con muy pocos datos, o cuando no hay variables que expliquen el comportamiento del fenómeno a estudiar.

Existen técnicas para establecer pronósticos mediante el uso de información cuantitativa. Éstos métodos se basan en el estudio de información histórica para estimar los valores futuros de la variable de interés. Dentro de estas técnicas, se encuentran los modelos causales que requieren de otras variables que se relacionan de la manera causa – efecto con la variable que se desea predecir, por otra parte, están los modelos univariados que predicen el futuro de una serie con base en su propio comportamiento histórico. Los modelos univariados son muy útiles si el patrón detectado en el pasado se mantiene hacia el futuro.

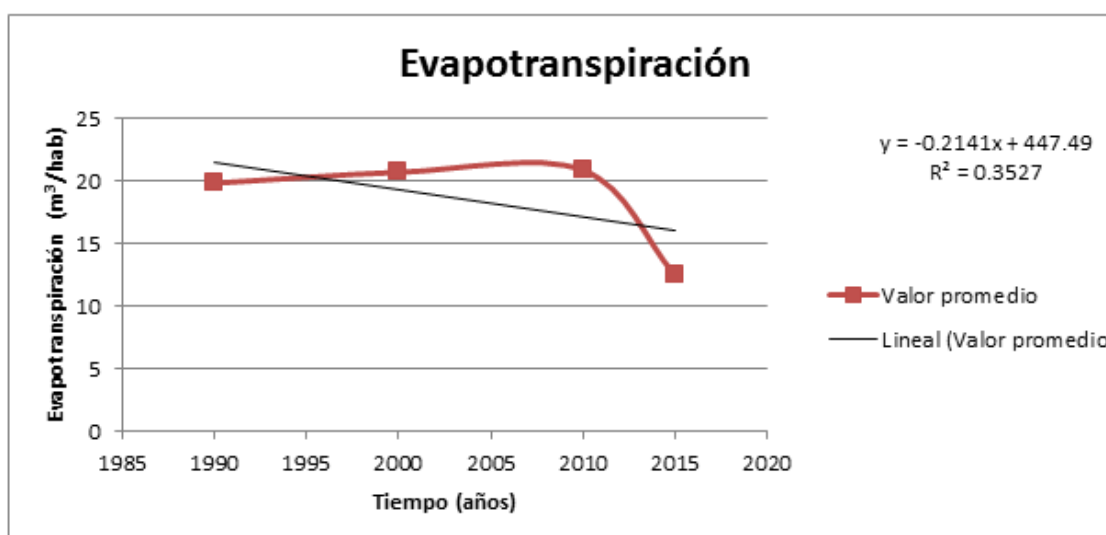
Para el análisis en la generación de modelo de distribución espacial se utilizaron series de tiempo según un método denominado ARIMA. El Modelo de Media Móvil Integrada Autoregresiva (ARIMA, por sus siglas en inglés) es una de las técnicas más empleadas en los modelos de series de tiempo. Su popularidad se debe a sus propiedades estadísticas, tratándose de un modelo flexible, de manera que pueda representar distintos tipos de series de tiempo. En el modelo ARIMA, el valor futuro de la variable a estudiar se asume que es una función lineal de un conjunto de observaciones realizadas en el pasado. De tal manera que se tiene que:

$$y_t = \theta_0 + \phi_1 y_{t-1} + \phi_2 y_{t-2} + \dots + \phi_p y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_p \varepsilon_{t-p}$$

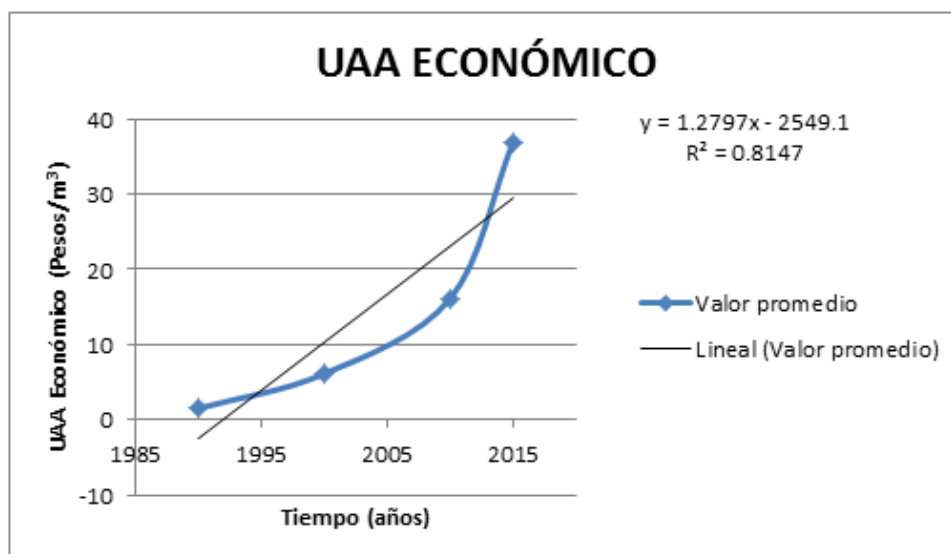
Donde y_t y ε_t son el valor actual y aleatorio del error en el tiempo t , respectivamente; ϕ_i ($i = 1, 2, \dots, p$) y θ_j ($j = 1, 2, \dots, q$) son parámetros del modelo. Los parámetros p y q son valores enteros y normalmente están referidos a la orden del modelo. Los errores aleatorios, ε_t , se asume que son independientes e idénticamente distribuidos con una media de cero y una varianza constante de σ^2 .

Para este trabajo, se utilizó el modelo ARIMA con el objeto de predecir el comportamiento futuro de las variables evapotranspiración (m^3/hab), el Uso y Aprovechamiento del Agua Económico (Pesos/ m^3) y el Uso y Aprovechamiento del Agua Ecológico (m^3/Km^2). En el archivo Excel, en un primer cálculo, se observan las gráficas con el comportamiento histórico de cada variable, cada comportamiento corresponde a los datos de entrada que necesita el modelo ARIMA para su aplicación (variable y datos temporales).

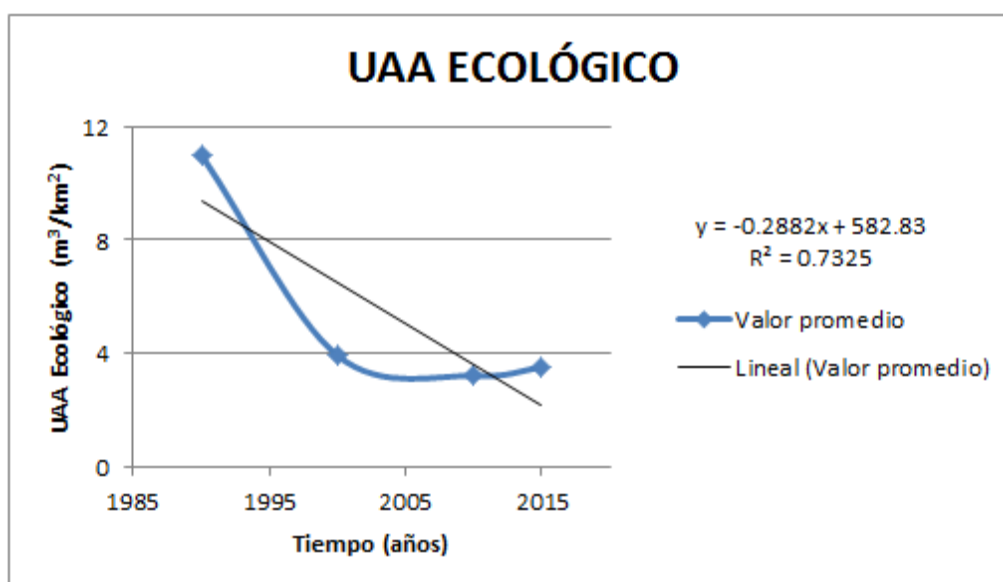
Año	ETR mínimo	ETR promedio	ETR máximo
1990	0.73	19.77	0.11975
2000	0.45	20.63	0.12126
2010	0.08	20.81	0.14583
2015	0.49	12.46	0.08101



Año	UAA_EC mínimo	UAA_EC promedio	UAA_EC máximo
1990	0	1.53	38.13
2000	0	6.13	113.03
2010	0	16.11	299.16
2015	0	36.91	322.94



Año	UAA_EL mínimo	UAA_EL promedio	UAA_EL máximo
1990	0	10.99	290.65
2000	0	3.92	125.56
2010	0	3.21	144.98
2015	0	3.51	185.53



Enseguida se calcula la predicción de la variable UAA Ecológico mostrando su tendencia hacia el futuro (años 2020 – 2050). Finalmente, se muestra la predicción para la variable UAA Económico y finalmente en la hoja 4 se encuentra el pronóstico de la variable evapotranspiración, para el mismo periodo (2020 – 2050).

XLSTAT 2017.01.41744 - ARIMA - Comienzo: 23/02/2017 a las 10:20:09 a.m. / Final: 23/02/2017 a las

Series temporales: Libro = datos.xlsx / Hoja = Hoja1 / Rango = Hoja1!\$D\$26:\$D\$30 / 4 filas y 1 columna

Datos de fecha: Libro = datos.xlsx / Hoja = Hoja1 / Rango = Hoja1!\$B\$26:\$B\$30 / 4 filas y 1 columna

Intervalos de confianza (%): 95

Centrar: Sí

Parámetros del modelo: $p = 1 / d = 0 / q = 0 / P = 0 / D = 0 / Q = 0 / s = 0$

Optimizar: Verosimilitud (Convergencia = 0.00001 / Iteraciones = 500)

Predicción: 7

Intervalos de confianza (%): 95

Semilla (números aleatorios): 123456789

Relanzar:

Estadísticos descriptivos:

Variable	Observaciones	Obs. con datos perdidos	Obs. sin datos perdidos	Mínimo	Máximo
UAA_EL promedio	4	0	4	3.210	10.990

Resultados de la modelización ARIMA de la serie UAA_EL promedio:

Resultados tras la optimización (UAA_EL promedio):

Estadísticos de bondad del ajuste:

Observacion	4
GL	2
SEC	41.7128183
MEC	10.42820458
RMSE	3.229273072
Varianza RB	10.42820458
MAPE(Dif)	51.14591849
MAPE	51.14591849
-2Log(Vero.)	20.73341319
FPE	17.38034096
AIC	24.73341319
AICC	36.73341319
SBC	23.50600191
Iteraciones	17

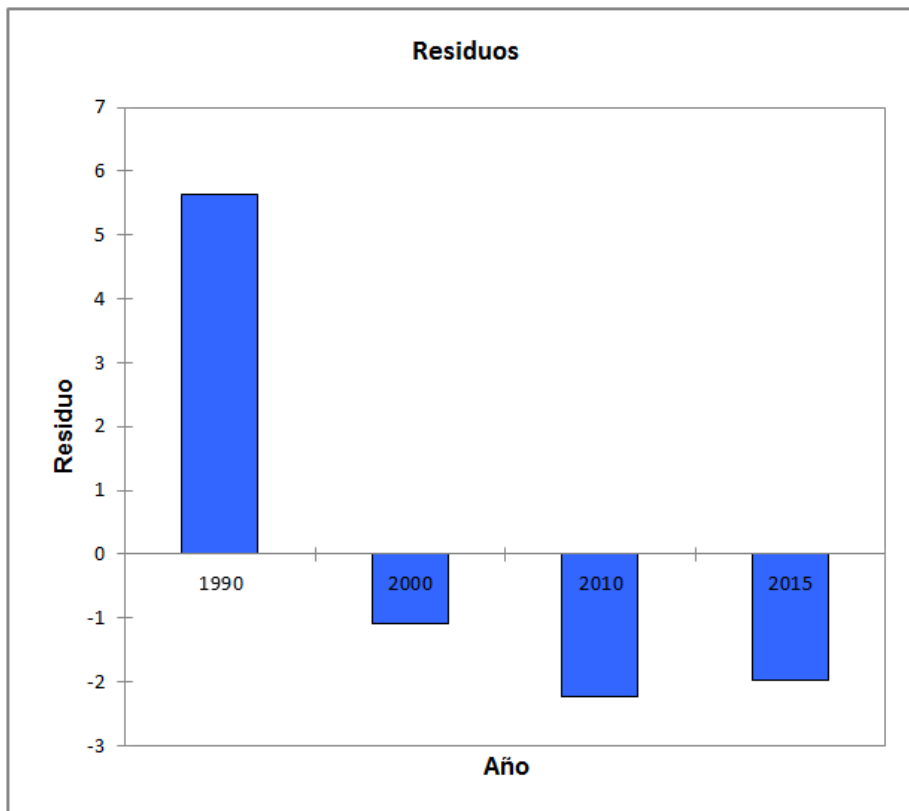
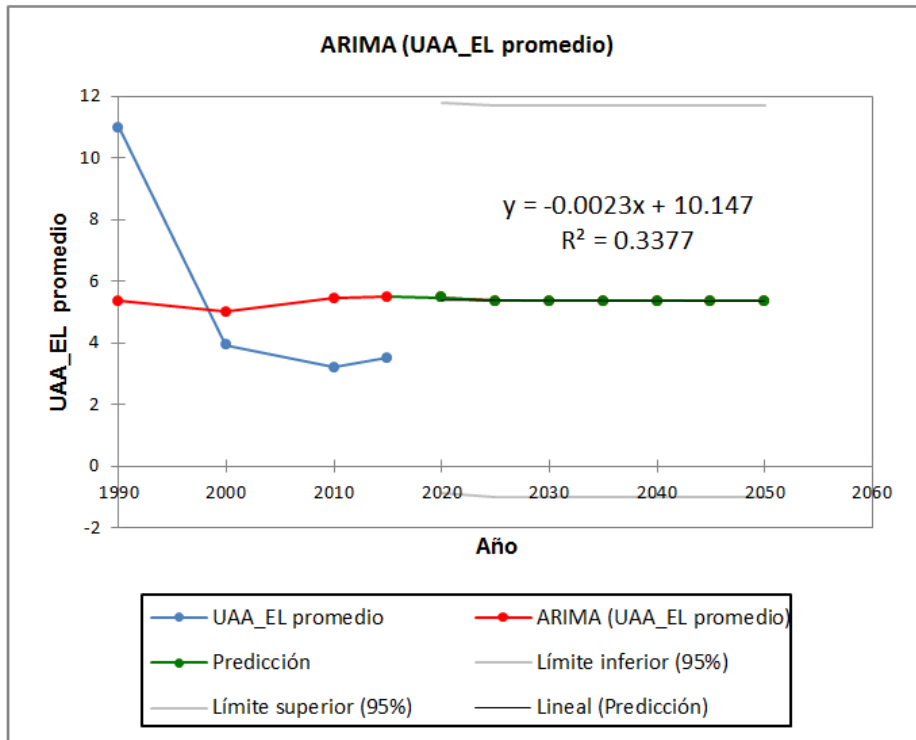
Parámetros del modelo:

Parámetro	Valor	Error típico Hess.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
Constante	5.352	1.543	2.328	8.377

Parámetro	Valor	Error típico Hess.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Error típico asint.	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
AR(1)	-0.062	0.779	-1.590	1.466	0.499	-1.040	0.916

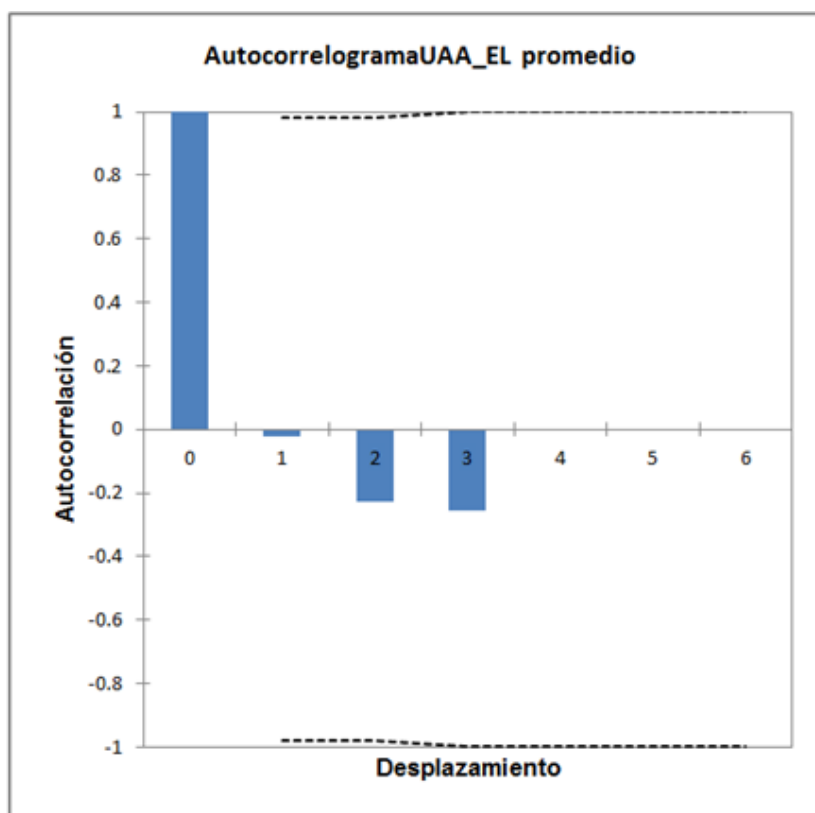
Predicciones y residuos:

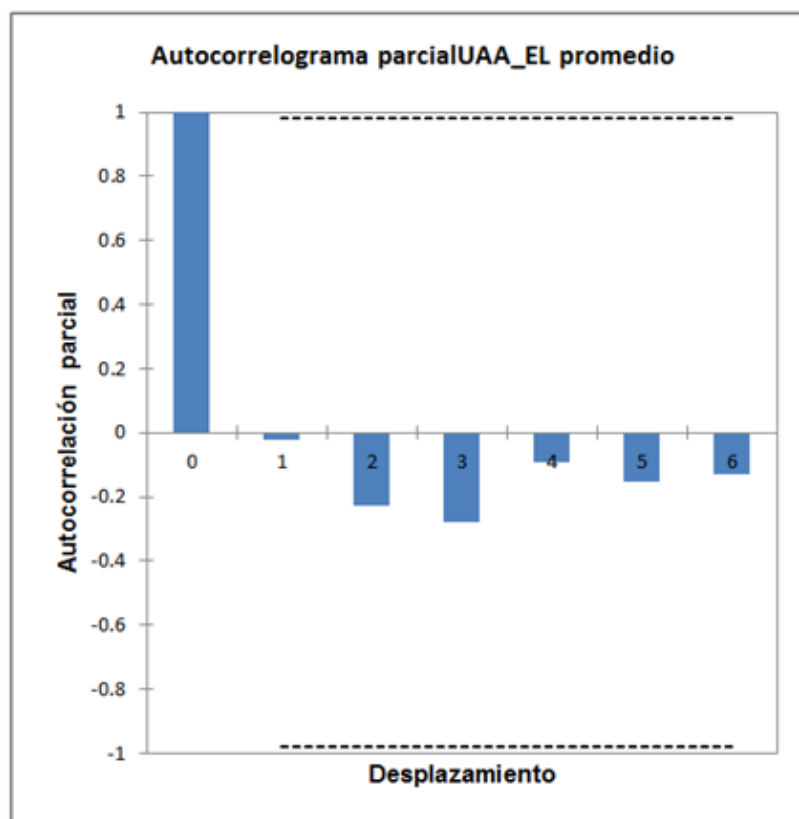
Observaciones	UAA_EL promedio	ARIMA(UAA_E L promedio)	Residuos	Residuos estandarizados	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
1990	10.990	5.363	5.627	1.743			
2000	3.920	5.003	-1.083	-0.335			
2010	3.210	5.441	-2.231	-0.691			
2015	3.510	5.485	-1.975	-0.612			
2020		5.466			3.229	-0.863	11.796
2025		5.345			3.235	-0.996	11.686
2030		5.353			3.235	-0.989	11.694
2035		5.352			3.235	-0.989	11.694
2040		5.352			3.235	-0.989	11.694
2045		5.352			3.235	-0.989	11.694
2050		5.352			3.235	-0.989	11.694



Análisis descriptivo (UAA_EL promedio):

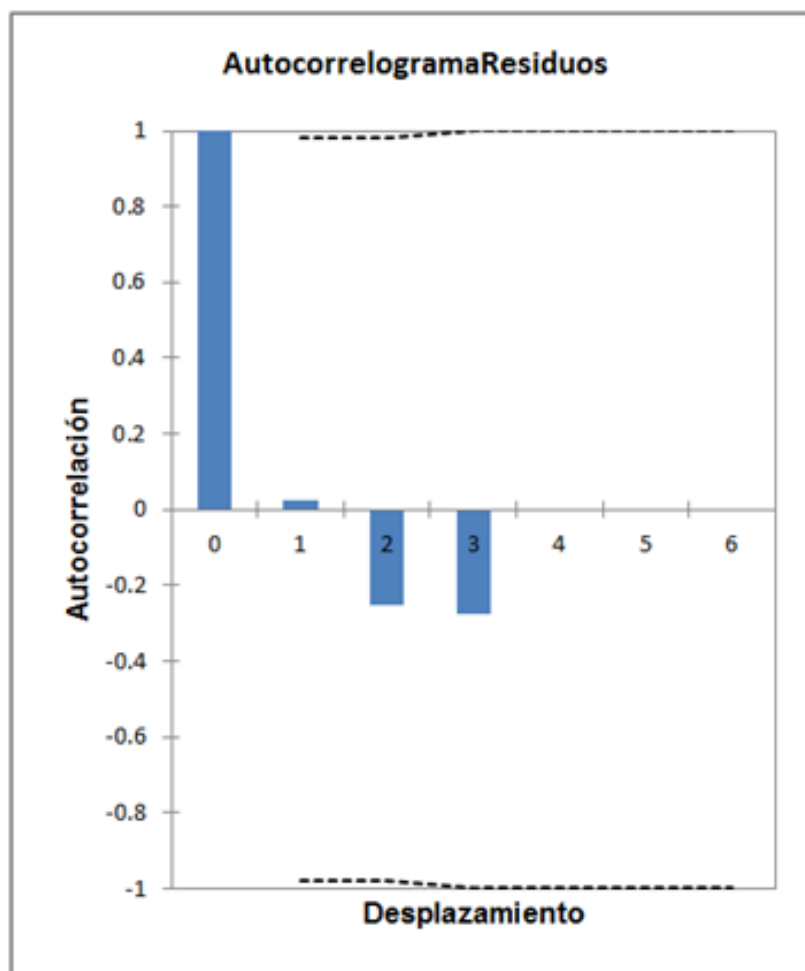
Desplazamiento	Autocorrelación	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Autocorrelación parcial	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
0	1.000	0.000			1.000	0.000		
1	-0.021	0.500	-0.980	0.980	-0.021	0.500	-0.980	0.980
2	-0.226	0.500	-0.980	0.980	-0.226	0.500	-0.980	0.980
3	-0.253	0.525	-1.000	1.000	-0.278	0.500	-0.980	0.980
4	0.000	0.555	-1.000	1.000	-0.092	0.500	-0.980	0.980
5	0.000	0.555	-1.000	1.000	-0.151	0.500	-0.980	0.980
6	0.000	0.555	-1.000	1.000	-0.130	0.500	-0.980	0.980

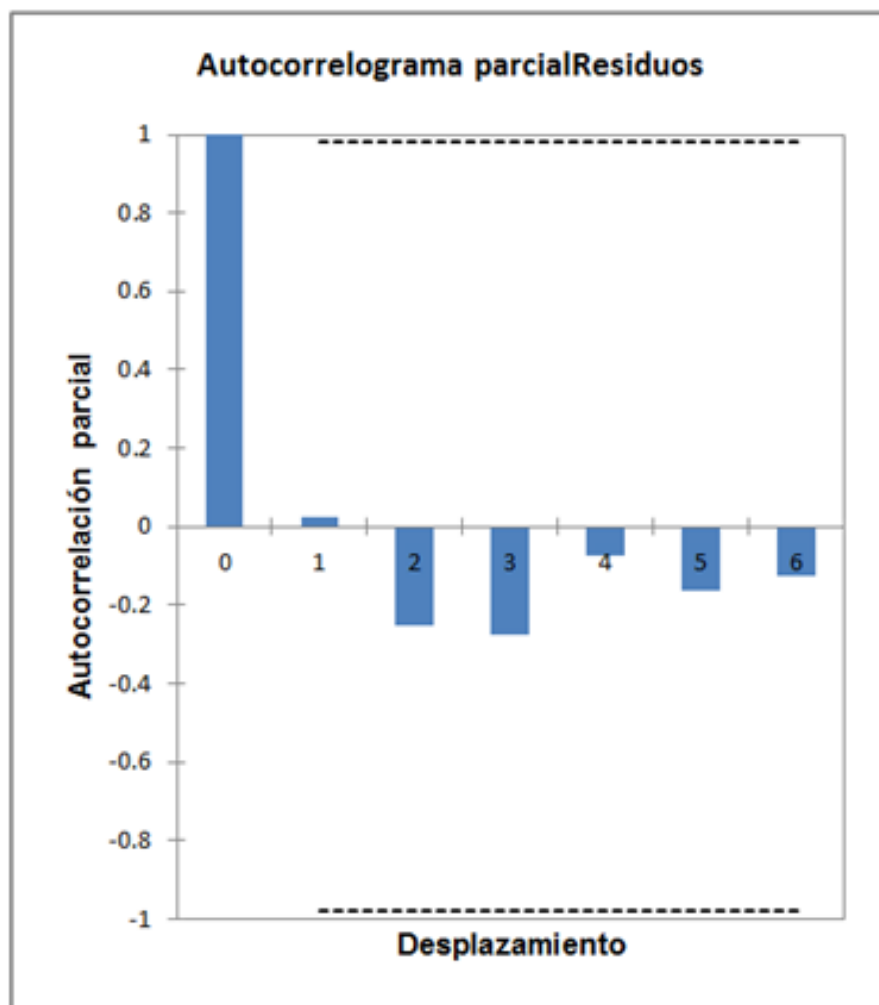




Análisis descriptivo (Residuos):

Desplaza- miento	Autoco- rrelación	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)	Autoco- rrelación parcial	Error estándar	Límite inferior (95%)	Límite superior (95%)
0	1.000	0.000			1.000	0.000		
1	0.024	0.500	-0.980	0.980	0.024	0.500	-0.980	0.980
2	-0.250	0.500	-0.981	0.981	-0.251	0.500	-0.980	0.980
3	-0.274	0.531	-1.000	1.000	-0.278	0.500	-0.980	0.980
4	0.000	0.565	-1.000	1.000	-0.075	0.500	-0.980	0.980
5	0.000	0.565	-1.000	1.000	-0.163	0.500	-0.980	0.980
6	0.000	0.565	-1.000	1.000	-0.127	0.500	-0.980	0.980





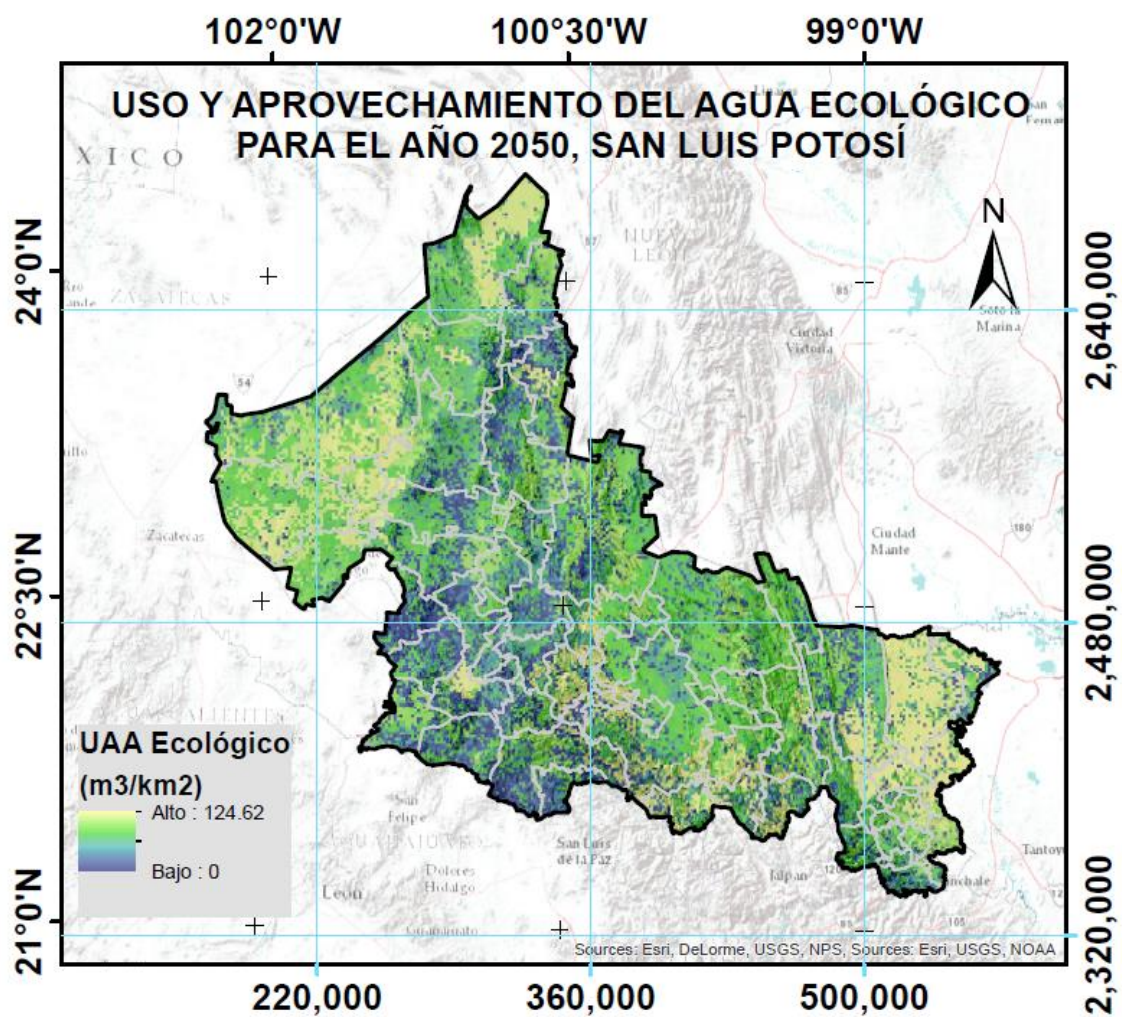


Figura 54. Proyección del uso y aprovechamiento ecológico del agua para el año 2050 en el estado de San Luis Potosí.

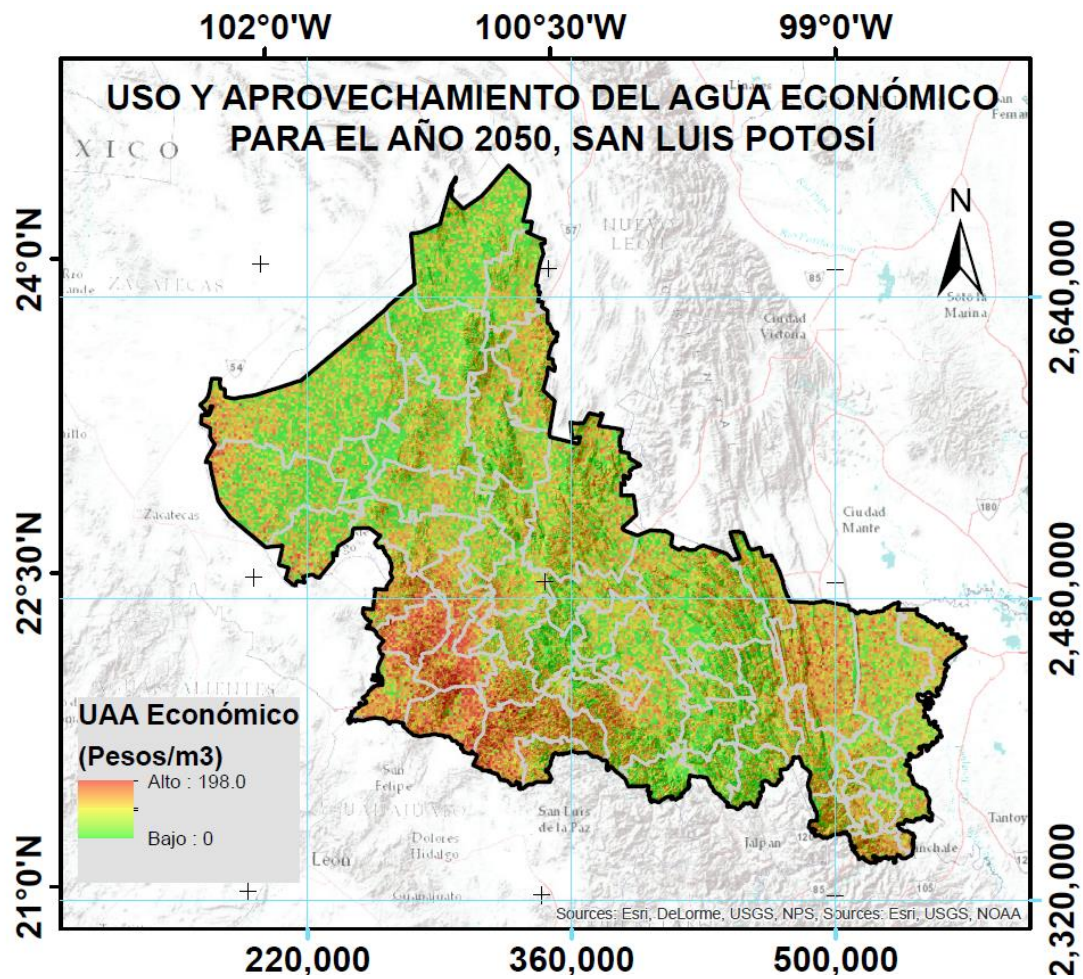


Figura 55. Proyección del uso y aprovechamiento económico del agua para el año 2050 en el estado de San Luis Potosí.

Actualmente se habla de la crisis del agua que vendrá en el futuro, pero desgraciadamente esa crisis ya está aquí. En el mundo la viven diariamente 1,100 millones de personas, las cuales no tienen acceso al agua potable. En México, alrededor de 12 millones padecen esta situación. En cuanto a acceso a saneamiento en el mundo, se calcula que 2 mil 400 millones no cuentan con él, mientras que en México 24 millones carecen de alcantarillado. Además, hay una gran cantidad de cuerpos de agua, superficiales y subterráneos, muy contaminados.

Hacer proyecciones a futuro resulta complicado, sin embargo, el uso de modelos matemáticos permite considerar la variación de los resultados al modificar las variables y el nivel en el que éstas se involucran. Esta es la aportación que este trabajo de investigación pretende exponer, además de hacer pública la metodología que sirvió de base para desarrollarlo.

3.8. Discusión

A partir de datos meteorológicos, económicos y ecológicos e imágenes de satélite se desarrollaron indicadores sobre el UAA, aplicando métodos geoestadísticos y de Percepción Remota.

En este estudio, la estimación del UAA se realizó a una escala regional analizando un periodo de tiempo de 25 años. De lo cual se involucraron variables como la ETR, estimada a partir de datos climatológicos mediante el método de Turc, el uso de suelo en el estado, determinado a partir de clasificación supervisada aplicando la Teledetección y la distribución del PIB obtenida mediante la simulación espacial de datos económicos. Finalmente, se generó un modelo que describe la distribución del VSA derivada de datos de extracción de volúmenes de aguas nacionales.

Para este trabajo, la relación entre la ETR y el UAA es de suma importancia, pues se entiende que la ETR indica el consumo de agua en una región. Por lo tanto, el UAA económico y ecológico determinan los aprovechamientos generados, respectivamente, por el consumo de agua en el Estado.

Por otra parte, el contar con datos económicos y de volúmenes de aguas nacionales a nivel estatal hace imposible que la distribución de los mismos tenga una alta precisión. Los modelos generados con este método muestran un comportamiento aproximado del fenómeno a lo largo del territorio potosino.

Este estudio en la generación de indicadores económicos y ecológicos del Uso y Aprovechamiento del Agua, permitirá que se tomen decisiones para generar políticas y/o planes del manejo sustentable para los recursos hídricos. Además de contribuir a un mejor entendimiento del uso que se le da al agua en estado y su relación con los distintos sectores económicos que hacen uso de este recurso.

La experimentación con el método que se generó, para la generación de un modelo de distribución espacial fue un trabajo arduo e implicó una serie de procesos complejos de manera a integrar diversas variables requeridas para la estimación del Uso y Aprovechamiento del Agua.

El método puede variar si se incorpora estrategias diversas multicriterio, debido a la variedad de mejora en los procesos de tratamiento de las imágenes de satélite y las adaptaciones de procesos geoestadísticos.

Podría considerarse a otras variables adicionales a este procedimiento que se incorporó en la metodología, sin embargo, el objetivo del trabajo se concentró a establecer un método que permitiera la estimación de UAA según la disponibilidad de datos, los tipos de imágenes y la adecuación de diversos procesos geoestadísticos.

Los resultados finales del modelo de distribución espacial son un acontecimiento expectativo de lo que podría suceder, en caso de no considerar un manejo sustentable del agua, y tales resultados, nos han incetivado a seguir explorando con otras variables y otras estrategias multicriterio, sobre nuevos mecanismos para la mejora en la estimaciones espaciales en cuanto a distribución del recurso hídrico como patrón de comportamiento para los próximos años.

Referencias

- Abdalla F (2012) Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques: a case study from the Central Eastern Desert, Egypt. *J African Earth Sci* 70:8–17
- Aguilar, L. (1993) *Problemas públicos y Agenda de Gobierno*, México: Ed. Porrúa.
- Almazán, J., Palomino, M., & Márquez, H. (2009). *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- Allen G, R., L. Santos P., D. Raes, y M. Smith. 2006. *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. p 298.
- Alonso F., (2005). *Sistemas de Información Geográfica*, Murcia.
- Amin S; Engel B A (1990). Prediction of runoff and sediment from agricultural watersheds by mathematical model. II: Watershed simulation. *Iran Agricultural Research*, 9, 1–16
- Andrews, S. Fastqc, (2010). A quality control tool for high throughput sequence data.
- Augen, J. (2004). *Bioinformatics in the post-genomic era: Genome, transcriptome, proteome, and information-based medicine*. Addison-Wesley Professional.
- Banco Mundial. (1998). *Estrategia para el manejo integrado de los recursos hídricos*. Washington, D. C. pp.6-81
- Bastiaanssen, W., Mobin-ud-Din, A. and Zubair T. 2003. *Upscaling water productivity in irrigated agriculture using remote sensing and GIS technologies*. In Kijne, J., Molden, D. & Barker, R. (eds.). *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*. Comprehensive Assessment of Water

- Management in Agriculture. Series N° 1. CABI Publishing, Wallingford, UK, pp. 289-300.
- Batty, M. (1993). Using geographic Information systems in urban planning and policy-making, en Fischer, M. & Nijkamp, P., (eds.). Geographic Information systems, spatial modeling and policy evaluation, Springer-Verlag, Berlin, pp. 51-69.
- Beasley D B; Huggins L F; Monke J M (1980). ANSWERS: a model for watershed planning. Transactions of the ASAE, 23, 938–944
- Beasley D B; Huggins L F (1982). ANSWERS user's manual. Department of Agricultural Engineering. Purdue University, West Lafayette, IN, USA
- Bergstrom, S. (1976). Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian Catchments. Report RH07, Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Norrkoping, Sweden, 134 pp.
- Beven K., & Kirkby M. (1979). Mint: Physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin des Sciences Hydrologiques. 24(1):43– 69
- Bigas, H. (Ed.) (2012), The Global Water Crisis: Addressing an Urgent Security Issue, Papers for the InterAction Council, 2011-2012, UNU-INWEH, Hamilton, Canada.
- Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F. 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. Statistical Applications in the Earth Sciences. 89-9:171-183.
- Borah, D., and Bera, M. (2004). Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of applications. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE). 47(3), 789-803.

- Boyle, D.P., Gupta, H.V., Sorooshian, S., Koren, V., Zhang, Z., and Smith, M. (2001). Toward improved streamflow forecast: value of semidistributed modeling. *Water Resources Research*, 37(11), 2749-2759.
- Blankenberg, D., Kuster, G. V., Coraor, N., Ananda, G., Lazarus, R., Mangan, M., ... & Taylor, J. (2010). Galaxy: a web- based genome analysis tool for experimentalists. *Current protocols in molecular biology*, 19-10.
- Bolger, A., & Giorgi, F. Trimmomatic: A Flexible Read Trimming Tool for Illumina NGS Data. URL <http://www.usadellab.org/cms/index.php>.
- Breña, A., & Breña, J. (2007). *Disponibilidad de agua en el futuro de México*. *Ciencia. Revista de la Academia Mexicana de la Ciencia*. 58, pp.64-71
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2016). Ley de Aguas Nacionales. Noviembre 19, 2016, de Honorable Cámara de Diputados Sitio web: <http://www.diputados.gob.mx/>
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (2016). Reglamento Interior de la Comisión Nacional del Agua. Noviembre 19, 2016, de Honorable Cámara de Diputados Sitio web: <http://www.diputados.gob.mx/>
- Cañez, A. (2011). Patrones de decisión en la acción gubernamental municipal: el caso de Hermosillo, Sonora. Tesina de Maestría en Centro de Investigación y Docencia Económicas, México, D.F.
- Cañez, A. La gestión integrada de recursos hídricos en la política federal del agua: propuesta para la nueva Ley General de Aguas en México. *Gestión y Análisis de Políticas Públicas 2015*, (Enero-Junio): [Fecha de consulta: 19 de noviembre de 2016] Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=281538241005>
ISSN 1134-6035

Centers for Disease, Control and Prevention. (2007). Viral Hepatitis. 11 de abril de 2016, de Division of Viral Hepatitis and National Center for HIV/AIDS, Viral Hepatitis, STD, and TB Prevention Sitio web: <http://www.cdc.gov/hepatitis/index.htm>

Cosgrove, W. & Rijsberman, F. (2000), *Visión mundial del agua: que el agua sea asunto de todos*, Earthscan Publications Ltd, Reino Unido, 116 pp. Disponible en: www.worldwatercouncil.org/index.php?id=963&L=0%20

Cosgrove, W. , & Rijsberman, F. (2014). *World water vision: making water everybody's business*. World Water Council. Earthscan from Routledge.

Cosgrove, W. & Rijsberman, F. (2016). *La utilización del agua en la actualidad*. Julio1, 2016, de World Water Council. Disponible en: <http://www.worldwatercouncil.org/fileadmin/wwc/Library/WWVision/spWW02.pdf>

Daly, C. Neilson R. & Phillips, D. (1994) A statistical—topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *Journal of Applied Meteorology*. 33(2):140–158.

Domínguez, J. (2006), *La gobernanza del agua en México y el reto de la adaptación en zonas urbanas: el caso de la Ciudad de México*, México, D.F. Anuario de estudios urbanos, UAM Azcapotzalco.

Estakhri, R. (1999). Use of different infiltration equations in ANSWERS model and its effect on prediction of runoff and sediment. MSc Thesis. Shiraz University, Shiraz, Iran.

- FAOSTAT (2004): *FAOSTAT on line database*. Julio1, 2016, Disponible en:
<http://apps.fao.org/default.jsp>.
- FAO-AQUASTAT (2003) *Food and Agriculture Organization of the United Nations*,
 Rome, Italy. Julio1, 2016, Disponible en:
<ftp://ftp.fao.org/ag/aglw/aquastat/aquastat2003.xls>
- García, J. (1992). Los sistemas de información geográfica en la administración territorial. V Coloquio de Geografía Cuantitativa. Universidad de Zaragoza, Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio, pp.105-114.
- García, L. (1998): Manejo integrado de los recursos hídricos en América Latina y el Caribe. ENV-123. Washington D.C: Banco Mundial.
- Garosi, A. (1997). Modification of the ANSWERS model for prediction of Sediment Delivery Ratio (SDR) in a small agricultural watershed. MSc Thesis. Shiraz University, Shiraz, Iran.
- Giardine, B., Riemer, C., Hardison, R. C., Burhans, R., Elnitski, L., Shah, P., ... & Nekrutenko, A. (2005). Galaxy: a platform for interactive large-scale genome analysis. *Genome research*, 15(10), 1451-1455.
- Glass, N.. (2003). The Water Crisis in Yemen: Causes, Consequences and Solutions. *Global Majority E-Journal*, 1, pp.17-30.
- Gleick, P. . (2010). Water, War & Peace in the Middle East. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 36, pp.6-42.
- Gleick, H.P. (1993), "Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security", *JSTOR International Security*, Vol. 18, No. 1. (Summer), pág. 79-112. Disponible en: <http://links.jstor.org/sici?sici=0162-2889%28199322%2918%3A1%3C79%3AWACFWR%3E2.0.CO%3B2-C>

- Gleick, P. (1993). Water and Conflict: Fresh Water Resources and International Security. *International Security*, 18, pp.79-112.
- Global Water Partnership, Technical Advisory Committee (TAC), 2000. Integrated Water Resources Management, TAC Background Papers N° 4. Disponible en www.gwpforum.org/gwp/library/TACNO4.PDF
- Graham, D. N., and Butts, M. B. (2006). Flexible integrated watershed modeling with MIKE SHE. In V. P. Singh (Ed.), *Watershed Models*: CRC Press.
- Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, Johannesburgo (Sudáfrica), 26 de agosto a 4 de septiembre de 2002 (publicación de las Naciones Unidas, número de venta: S.03.II.A.1 y corrección), cap. I, resolución 2, anexo.
- Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, Río de Janeiro, 3 a 14 de junio de 1992 (publicación de las Naciones Unidas, número de venta: S.93.I.8 y correcciones), vol. I: Resoluciones aprobadas por la Conferencia, resolución 1, anexo II.
- Informe de la Conferencia Internacional sobre la Población y el Desarrollo. El Cairo, 5 a 13 de septiembre de 1994 A/CONF.171/13: Informe de la CIPD (94/10/18) Capítulo VIII. Salud, morbilidad y mortalidad. Resolución 8.10.
- Informe sobre Desarrollo Humano 2006: Más allá de la escasez: Poder, pobreza y crisis mundial del agua. PNUD, 2006.
- Johnston, KM. y Tomlin, C.D. (1990): «An experiment in land-use allocation with a geographic information system», en: Marble, D.F. y Peuquet, Di. eds., *Introductory readings in geographic information systems*, Taylor & Francis, Londres, pp. 159-169.

- Ki-moon, B.. (2008). Address as prepared for delivery to the Davos World Economic Forum. Abril 3, 2016, de UN News Centre Sitio web: http://www.un.org/apps/news/infocus/speeches/search_full.asp?statID=177
- Lankford, B.A.; Merrey, D.J.; Cour, J.; Hepworth, N. (2007). From Integrated to Expedient: An Adaptive Framework for River Basin Management in Developing Countries. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institut (IWMI Research Report 110).
- Lejano, R. & Ingram, H. (2008). "How Social Network Enable Adaptation to System Complexity and Extreme Weather Events". En: Pahl-Wostl, C.; Kabat, P.; Möltgen, J. (Eds) "Adaptive and Integrated Water Management: Coping with Complexity and Uncertainty". Alemania. Springer-Verlag. pp. 249-262.
- Liu, Z., and Weller, D. E. (2007). A stream network model for integrated watershed modeling. *Environmental Modeling and Assessment*, 13(2), 291-303.
- Melone, F., Barbetta, S., Diomede, T., Peruccacci, S., Rossi, M., Tessarolo, A., et al. (2005). Review and selection of hydrological models – integration of hydrological models and meteorological inputs.
- Maidment, D. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS applications of geographic information systems in hydrology and water resources management. En: Proceedings of EGU International Conference; 1993 Vienna: pp. 181–192.
- Majone, G. (2009), "Agenda Setting", en *The Oxford Handbook of Public Policy* , Oxford: Oxford University Press.
- Mandeville A., O'Connell P., Sutcliffe J., & Nash J. (1970) River flow forecasting through conceptual models Part III—the ray catchment at Grendon Underwood. *Journal of Hydrology*.11(2):109–128.

- Montgomery D. & Dietrich W. (1994) A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, 30(4):1153–1171.
- Naciones Unidas. (1979). Convención sobre la eliminación de todas las formas de discriminación contra la mujer. 14 de abril de 2016, de Asamblea General de las Naciones Unidas Sitio web: <http://www.un.org/womenwatch/daw/cedaw/text/sconvention.htm>
- Naciones Unidas. (1979). Convención sobre los Derechos del Niño. 14 de abril de 2016, de Oficina del Alto Comisionado para los Derechos Humanos (ACNUDH) Sitio web: <http://www.ohchr.org/SP/ProfessionalInterest/Pages/CRC.aspx>
- Nash J. & Sutcliffe J. (1970). River flow forecasting through conceptual models Part I — a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3):282–290.
- Nava, L. y Sandoval, S. (2014). Multi-tiered Governance of the Rio Grande/Bravo Basin: The Fragmented Water Resources Management Model of the United States and Mexico. *International Journal of Water Governance* (2), pp. 85–106.
- O’Connell PE, Nash JE & Farrell JP. Mint: River flow forecasting through conceptual models Part II—the Brosna catchment at Ferbane. *Journal of Hydrology*. 1970;10(4):317– 329.
- OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development). 2008. *OECD Environment Outlook to 2030*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Oficina de Naciones Unidas de apoyo al Decenio Internacional para la Acción “El agua, fuente de vida” 2005-2015 (UNO-IDFA)/Programa de ONU-Agua de Promoción y Comunicación (UNW-DPAC). (2010). *Los ODM sobre Agua y Saneamiento Guía de lectura*. Zaragoza, España: Programa de ONU-Agua de Promoción y Comunicación (UNW-DPAC).

- Organización Meteorológica Mundial. (1992). Declaración de Dublín sobre el Agua y el Desarrollo Sostenible. 14 de abril de 2016, de Conferencia Internacional sobre el Agua y el Medio Ambiente (CIAMA) Sitio web: <http://www.wmo.int/pages/prog/hwrp/documents/espanol/icwedecs.html>
- Pahl-Wostl, C., J. Möltgen, J. Sendzimir, y P. Kaba. 2005. New Methods for Adaptive Water Management under Uncertainty – The NeWater project. Conference Proceedings. Menton, Francia: EWRA.
- Pochat, Víctor (2008), Principios de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos: base para el desarrollo de planes nacionales, GWP (Centro y Sudamérica).
- Rajae Sh (1996). Determination of clay enrichment ratio in runoff sediment from agricultural watershed in college of Agriculture. MSc Thesis. Shiraz University, Shiraz, Iran.
- Razavian D (1990). Hydrologic responses of an agricultural watershed to various hydrologic and management conditions. *Water Research Bulletin*, 26, 777–785
- Redman, C.; Morgan, J.; Kuby, L. (2004). “Integrating Social Science into the Long-Term Ecological Research (LTER) Network: Social Dimensions of Ecological Change and Ecological Dimensions of Social Change”. *Ecosystems*, Vol. 7, pp. 161-171.
- Rogers, K.H. (2006). “The Real River Management Challenge: Integrating Scientists, Stakeholders and Service Agencies”. *River Research and Applications*, Wiley InterScience, Vol. 22, No. 2, pp. 269-280.
- Sánchez Bravo, Á., ed., (2013). *Justicia y Medio Ambiente*. 1st ed. España: Punto Rojo, pp.156-158.

- Santacruz, G. (2007). *Hacia una gestión integral de los recursos hídricos en la cuenca del Río Valles, Huasteca, México*. (Tesis de grado) Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Singh R; Tiwari K N; Mal B C (2006). Hydrological studies for small watershed in India using the ANSWERS model. *Journal of Hydrology*, 318, 184–199.
- UNEP and Pacific Institute. (2010). *Clearing the Waters. A focus on water quality solutions*. Nairobi, Kenya: UNON, Publishing Services Section.
- UNEP (2012). *The UN-Water Status Report on the Application of Integrated Approaches to Water Resources Management*. United Nations Environment Programme
- UNESCO-IHP, 2012a. *Strategic Plan of the Eighth Phase of IHP (IHP-VIII, 2014-2021)*. Paris, France: UNESCO-IHP.
- UNESCO-IHP, 2012b. *Final Report. 20th Session of the Intergovernmental Council*. Paris, 4-7 June, 2012. Paris, France: UNESCO
- United Nations University. (2013). *Water Security & the Global Water Agenda*. Ontario, Canada: Institute for Water, Environment & Health (UNU-INWEH).
- Sowers, J., Vengosh, A. & Weinthal, E. (2011). *Water Scarcity Impacts and Potential Conflicts in the MENA Region*. *Climatic Change*, 104, pp.599–627.
- Starr, J. (1991). *Water Wars*. *Foreign Policy*, 82, pp.17-36.
- Torregrosa, M., et. al. (2012) *Los recursos hídricos en México* en Blanca Jiménez y José Galizia (coord.) *Diagnóstico de las Américas, Foro Consultivo Científico y Tecnológico*, AC, México

- Vörösmarty, C. J., C. Leveque, and C. Revenga. 2005. *Fresh Water. In Millennium Ecosystem Assessment*, Volume 1, Conditions and Trends Working Group Report. Washington, DC: Island Press.
- WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2016. Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo. París, UNESCO.
- Gao, B. C. (1996). NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3), 257-266.
- Jain, S. K., Singh, R. D., Jain, M. K., & Lohani, A. K. (2005). Delineation of flood-prone areas using remote sensing techniques. *Water Resources Management*, 19(4), 333-347.
- Jackson, T. J., Chen, D., Cosh, M., Li, F., Anderson, M., Walthall, C., & Hunt, E. R. (2004). Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. *Remote Sensing of Environment*, 92(4), 475-482.
- Fensholt, R., & Sandholt, I. (2003). Derivation of a shortwave infrared water stress index from MODIS near-and shortwave infrared data in a semiarid environment. *Remote Sensing of Environment*, 87(1), 111-121.
- Lee, M., Choi, J., Oh, H., Won, J., Park, I., Lee, S., 2012a. Ensemble-based landslide susceptibility maps in Jinbu area, Korea. *Environmental Earth Sciences* 67, 23-37.
- Lee, S., Song, K., Oh, H., Choi, J., 2012b. Detection of landslide using web-based aerial photographs and landslide mapping using geospatial analysis. *International Journal of Remote Sensing* 33, 4937-4966.

Lu, X., & Zhuang, Q. (2010). Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 114(9), 1924-1939.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), Human Development Report 2006: Beyond Scarcity—Power, poverty and the Global Water Crisis. Basingstoke, Reino Unido Palgrave Macmillan, 2006.