

Universidad de Guanajuato
División de Ingenierías
Maestría en Ciencias del Agua

Análisis geoestadístico bayesiano para determinar la evolución de la disponibilidad de agua subterránea en el Acuífero Independencia, Guanajuato.

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN
CIENCIAS DEL AGUA

AUTOR
ING. MANUEL AVILÉS JASSO

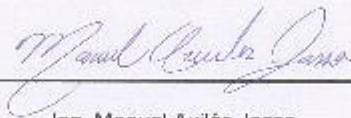
ASESORES
DR. JESÚS HORACIO HERNÁNDEZ ANGUIANO
DRA. YANMEI LI

Guanajuato, Gto. Octubre 2019

Declaratoria

Por medio de la presente me responsabilizo de la autenticidad y originalidad del trabajo titulado:

Análisis geoestadístico bayesiano para determinar la evolución de la disponibilidad de agua subterránea en el Acuífero Independencia, Guanajuato.



Ing. Manuel Avilés Jasso

Autor de la tesis



Dr. Jesús Horacio Hernández Anguiano

Director de tesis



Dra. Yanmei Li

Codirectora de la tesis

INDICE

| | | |
|---------------|---|----|
| I.1 | ANTECEDENTES..... | 1 |
| I.2 | OBJETIVOS | 4 |
| I.2.1 | OBJETIVO GENERAL..... | 4 |
| I.2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 4 |
| I.3 | HIPÓTESIS | 4 |
| I.4 | JUSTIFICACIÓN | 4 |
| I.5 | ALCANCE | 5 |
| CAPITULO II: | ÁREA DE ESTUDIO | 6 |
| II.1 | LOCALIZACIÓN | 6 |
| II.2 | FISIOGRAFÍA Y TOPOGRAFÍA | 7 |
| II.3 | HIDROGRAFÍA..... | 9 |
| II.4 | CLIMA | 10 |
| II.5 | GEOLOGÍA..... | 12 |
| II.5.1 | GEOHIDROLOGÍA..... | 13 |
| CAPITULO III: | MATERIALES Y MÉTODOS..... | 18 |
| III.1 | DATOS DE NIVELES FREÁTICOS | 18 |
| III.1.1 | Manejo de los datos de la Red de Monitoreo..... | 19 |
| III.1.2 | Cálculo de la elevación respectiva al nivel del mar de la profundidad | 20 |
| III.1.3 | Recuperación de datos..... | 20 |
| III.2 | ANÁLISIS DE DATOS | 21 |
| III.2.1 | Estadística descriptiva | 21 |
| III.2.2 | Prueba de normalidad..... | 23 |
| III.3 | ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO | 23 |
| III.3.1 | Semivariograma | 23 |
| III.3.2 | Empirical Bayesian Kriging..... | 24 |
| III.3.3 | Validación cruzada | 27 |
| III.4 | DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ANÁLISIS..... | 28 |
| III.5 | EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL NIVEL FREÁTICO | 29 |
| III.6 | EVALUACIÓN DE LA ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO | 29 |
| III.7 | CLASIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO 29 | |
| III.8 | EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA..... | 30 |

| | | |
|--------------|---|----|
| III.8.1 | Comparación de la Disponibilidad de agua subterránea y el índice de El niño y La Niña | 31 |
| III.9 | EXTRAPOLACIÓN DE TENDENCIAS..... | 31 |
| III.9.1 | Herramienta Curve Fit..... | 31 |
| III.9.2 | Coeficiente de Determinación..... | 32 |
| III.10 | Programación y automatización de herramienta en Python..... | 32 |
| CAPITULO IV: | RESULTADOS | 34 |
| IV.1 | DATOS RECUPERADOS..... | 34 |
| IV.2 | ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS | 34 |
| IV.3 | CALIBRACIÓN DEL MODELO GEOESTADÍSTICO EBK..... | 36 |
| IV.3.1 | Identificación de posibles datos atípicos (outliers)..... | 36 |
| IV.3.2 | Calibración del modelo EBK | 38 |
| IV.3.3 | Comparativa de valores predichos y valores observados | 42 |
| IV.3.4 | Análisis de los errores de predicción de la validación cruzada | 42 |
| IV.3.5 | Test de normalidad de los errores de predicción | 43 |
| IV.4 | ÁREA DE ANÁLISIS..... | 45 |
| IV.4.1 | Delimitación del área de análisis..... | 45 |
| IV.4.2 | Mapas de errores de predicción estandarizado..... | 46 |
| IV.4.3 | Comparativa de la predicción del modelo geoestadístico con el modelo conceptual | 48 |
| IV.4.4 | Mapas de predicción del nivel freático para cada periodo | 51 |
| IV.4.5 | Análisis espacial de la evolución del nivel freático por acuífero..... | 54 |
| IV.5 | VELOCIDAD DEL NIVEL FREÁTICO | 58 |
| IV.5.1 | Acuífero Laguna Seca (LS) | 58 |
| IV.5.2 | Acuífero Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ)..... | 60 |
| IV.5.3 | Acuífero San Miguel de Allende (SMA) | 62 |
| IV.5.4 | Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL) | 64 |
| IV.5.5 | Promedio en la Cuenca Independencia..... | 66 |
| IV.6 | ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO | 67 |
| IV.6.1 | Acuífero Laguna Seca (LS) | 67 |
| IV.6.2 | Acuífero Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ)..... | 70 |
| IV.6.3 | Acuífero San Miguel de Allende (SMA) | 72 |
| IV.6.4 | Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL) | 74 |
| IV.6.5 | Promedio en la Cuenca Independencia..... | 75 |

| | | |
|---------------|--|----|
| IV.7 | IMPLICACIONES DE LA CLASIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO | 76 |
| IV.8 | BALANCES DE AGUA SUBTERRÁNEA | 77 |
| IV.8.1 | Acuífero Laguna Seca (LS) | 78 |
| IV.8.2 | Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ) | 79 |
| IV.8.3 | San Miguel de Allende (SMA) | 81 |
| IV.8.4 | Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL) | 82 |
| IV.8.5 | Resumen del balance de agua subterránea en el acuífero Independencia | 83 |
| IV.8.6 | Comparación del volumen del balance hídrico con el índice del niño y la niña. | 84 |
| IV.9 | EVOLUCIÓN FUTURA DEL NIVEL FREÁTICO | 86 |
| IV.9.1 | Coefficiente de Determinación..... | 87 |
| IV.10 | HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DEL BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA 88 | |
| CAPITULO V: | DISCUSIÓN..... | 92 |
| V.1.1 | Datos recuperados | 92 |
| V.1.2 | Estadística descriptiva de los datos..... | 92 |
| V.1.3 | Calibración del modelo geoestadístico EBK | 92 |
| V.1.4 | Área de análisis..... | 93 |
| V.1.5 | Velocidad y aceleración del nivel freático..... | 93 |
| V.1.6 | Implicaciones de la clasificación de la velocidad y aceleración | 93 |
| V.1.7 | Balance de agua subterránea | 94 |
| V.1.8 | Evolución futura del nivel freático | 94 |
| CAPITULO VI: | CONCLUSIONES | 95 |
| CAPITULO VII: | REFERENCIAS | 97 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Ubicación de la Cuenca Alta del Río Laja (Cuenca Independencia) y los municipios localizados al interior de esta..... | 6 |
| Figura 2. Acuíferos dentro de la Cuenca Independencia..... | 7 |
| Figura 3. Fisiografía de la Cuenca Independencia..... | 8 |
| Figura 4. Hidrografía de la Cuenca Independencia..... | 9 |
| Figura 5. Precipitación y temperatura media anual en la Cuenca Independencia..... | 11 |
| Figura 6. Estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua dentro de la Cuenca Independencia..... | 11 |
| Figura 7. Precipitación media anual de los años 2008 al 2017 en la Cuenca Independencia..... | 12 |
| Figura 8. Geología del Acuífero Independencia (Ortega M, 2009)..... | 13 |
| Figura 9. Distribución de la red de pozos de monitoreo de CEAG en el área de estudio.. | 15 |
| Figura 10. Distribución y tipos de pozos de bombeo según uso (REPDA, 2017)..... | 16 |
| Figura 11. Diagrama del seguimiento de la metodología..... | 18 |
| Figura 12. Vista área y vista de calle en Google Earth del pozo CARL-228-B-P..... | 19 |
| Figura 13. Estimación de hueco de información en el pozo LS-78-P por medio de tendencia de la profundidad por temporadas, en rojo el dato faltante. Izquierda: tabla de datos con el nivel observado en el pozo en lluvia/secas. Derecha: gráfico del comportamiento d del nivel observado durante lluvia y secas..... | 20 |
| Figura 14. Dato de profundidad atípico modificado mediante uso de la tendencia promedio de los pozos cercanos, izquierda hidrograma original y derecha hidrograma con nuevo valor del dato atípico (punto rojo)..... | 21 |
| Figura 15. Histograma con valores medios y estadísticos de una serie de datos del nivel freático..... | 22 |
| Figura 16. Semivariograma empírico con una curva teórica ajustado..... | 24 |
| Figura 17. Semivariograma que usa el EBK donde: los Semivariogramas empíricos simulados se muestran como líneas azules sombreadas por densidad (cuantas más líneas azules pasan por el mismo sitio el azul mostrado es más oscuro) y las semivarianzas empíricas se muestran mediante cruces azules. La mediana de todos los semivariogramas azules se muestra en color rojo continuo y los percentiles 25 y 75 se muestran con líneas discontinuas de color rojo..... | 25 |
| Figura 18. Interfaz de la herramienta Geostatistical Wizard..... | 26 |
| <i>Figura 19. Área de modificación de parámetros.....</i> | 26 |
| Figura 20. Casos de las implicaciones de la clasificación de la velocidad y aceleración.. | 30 |
| Figura 21. Histogramas de las frecuencias de las clases del nivel freático con dimensión en metros sobre el nivel del mar (msnm) para cada año evaluado..... | 36 |
| Figura 22. Mapa del Voronoid (herramienta Cluster) para el año 2008, en las celdas en gris pertenece a outliers y el que se encuentra enmallado en azul representa al dato del CARL-6..... | 37 |
| Figura 23. Mapas de comparación de los errores de predicción de los distintos escenarios de calibración del nivel freático para el año 2008, arriba configuración por zonas administrativas y abajo en conjunto..... | 41 |
| Figura 24. Valores medidos versus los valores predichos por el modelo EBK para los años 2008-2017. La regresión del diagrama de dispersión lineal está representada por una línea continua roja, los límites de predicción del 95% de nivel de confianza mediante líneas grises discontinuas y el Coeficiente de Correlación se muestra como R..... | 42 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 25. Gráficos Q-Q normales de errores estandarizados para los años 2008-2017. La regresión del diagrama de dispersión lineal está representada por una línea continua roja, los límites de predicción al 95% de nivel de confianza mediante líneas grises discontinuas. | 44 |
| Figura 26. Mapa isolíneas de errores de predicción estandarizado para el año 2008 y la delimitación del área de estudio..... | 45 |
| Figura 27. Mapas de errores de predicción estandarizados para los años 2008-2012. | 46 |
| Figura 28. Mapas de errores de predicción estandarizado para los años 2013-2017..... | 47 |
| Figura 29. Modelo del nivel freático y direcciones de flujo del año 2018. | 49 |
| Figura 30. Modelo de Profundidad del nivel estático, distribución de carga hidráulica y líneas preferenciales de flujo de agua subterránea, 1998 (Ortega M, 2009)..... | 50 |
| Figura 31. Mapas de predicción del nivel freático para los años 2008-2012. | 52 |
| Figura 32. Mapa de predicción del Nivel freático para los años 2013-2017..... | 53 |
| Figura 33. Evolución del Nivel Freático del acuífero Laguna Seca..... | 54 |
| Figura 34. Evolución del Nivel Freático del acuífero Dr. Mora - San José Iturbide. | 55 |
| Figura 35. Evolución del Nivel Freático del acuífero San Miguel de Allende. | 56 |
| Figura 36. Evolución del Nivel Freático del acuífero Cuenca Alta del Río Laja..... | 57 |
| Figura 37. Mapas de velocidad del nivel freático en el acuífero Laguna Seca..... | 59 |
| Figura 38. Mapas de velocidad del nivel freático en el acuífero Laguna Seca | 61 |
| Figura 39. Mapas de Velocidad del nivel freático en el acuífero San miguel de Allende. . | 63 |
| Figura 40. Mapas de velocidad del nivel freático en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja. | 65 |
| Figura 41. Velocidad promedio del nivel freático, periodo 2008-2017, en la Cuenca Independencia. | 66 |
| <i>Figura 42. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero Laguna Seca.</i> | <i>68</i> |
| Figura 43. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero Dr. Mora – San José Iturbide. | 70 |
| Figura 44. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero San Miguel de Allende... | 72 |
| Figura 45. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero Cuenca Alta del Río Laja. | 74 |
| Figura 46. Aceleración promedio del periodo 2008-2017 de la Cuenca Independencia. .. | 76 |
| Figura 47. Implicaciones de la clasificación de la velocidad y aceleración del descenso del año 2008 al 2017. | 77 |
| Figura 48. Evolución del balance de agua subterránea para el periodo 2008-2017 del acuífero CARL. Los puntos negros son los datos calculados y en rojo la disponibilidad de CONAGUA. El gráfico muestra el grado de incertidumbre del balance realizado..... | 79 |
| Figura 49. Evolución del balance de agua subterránea del acuífero DMSJ para los periodos 2008-2017. | 80 |
| Figura 50. Evolución del balance de agua subterránea del acuífero SMA para los periodos 2008-2017. | 81 |
| Figura 51. Evolución del balance de agua subterránea del acuífero CARL para los periodos 2008-2017. | 83 |
| Figura 52. Comparación del balance de agua subterránea con el índice de Oscilación del Pacífico Norte América en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja..... | 85 |
| Figura 53. Comparación del balance de agua subterránea con el Índice de Oscilación del Pacífico Norte América en el acuífero San Miguel de Allende..... | 85 |

| | |
|--|----|
| Figura 54. Comparación del balance de agua subterránea con el Índice de Oscilación del Patrón Pacífico Norte América en el acuífero Dr. Mora - San José Iturbide. | 86 |
| Figura 55. Comparación del balance de agua subterránea con el Índice de Oscilación del Pacífico Norte América en el acuífero Laguna Seca. | 86 |
| Figura 56. Mapa de evolución futura del nivel freático para distintos años. | 87 |
| Figura 57. Mapa coeficiente de determinación. | 88 |
| Figura 58. Ventana de la herramienta GWAavailability. | 89 |

Lista de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Áreas de las zonas administrativas de la Cuenca Independencia. | 7 |
| Tabla 2. Precipitación promedio anual por zona administrativa. | 12 |
| Tabla 3. Número de pozos de monitoreo por zona administrativa en la Cuenca Independencia. | 15 |
| Tabla 4. Numero de pozos de suministro por acuífero dentro del Acuífero Independencia. | 17 |
| Tabla 5. Usos de los pozos de suministro y su volumen concesionado del Acuífero Independencia. | 17 |
| Tabla 6. Reglas de validación cruzada para verificar el ajuste del modelo. | 28 |
| Tabla 7. Estadísticas descriptivas del conjunto de datos de muestra en el área de estudio (niveles freáticos respecto a la m.a.s.l. en metros). Donde SD es Desviación Estándar, CV es Coeficiente de Variación y K-S (p) es la prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov. | 35 |
| Tabla 8. Pozos con mayor error positivo y negativo en la predicción del modelo LE-KB-390, considerando 175 datos con CARL-6 y 174 datos sin CARL-6. | 38 |
| Tabla 9. Comparación en errores en la predicción con y sin el pozo CARL-6. | 38 |
| Tabla 10. Configuración de parámetros del modelo de Kriging bayesiano empírico del nivel de agua subterránea del año 2008. | 39 |
| Tabla 11. Configuración de parámetros del modelo de Kriging bayesiano empírico del nivel de agua subterránea del año 2008 para cada zona administrativa. | 40 |
| Tabla 12. Configuración de los errores de predicción para comparar con las reglas de validación cruzada para los años 2008-2017. | 43 |
| Tabla 13. Test de normalidad de los errores de predicción para cada año evaluado. | 43 |
| Tabla 14. Grado de incertidumbre dentro del área de análisis para cada uno de los periodos analizados. | 48 |
| Tabla 15. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero Laguna Seca para los distintos periodos analizados. | 60 |
| Tabla 16. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero Dr. Mora - San José Iturbide para los distintos periodos analizados. | 62 |
| Tabla 17. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero San Miguel de Allende para los distintos periodos analizados. | 64 |
| Tabla 18. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero Cuenca Alta del Río Laja para los distintos periodos analizados. | 66 |
| Tabla 19. Aceleración promedio del nivel freático en el acuífero Laguna Seca para los distintos periodos analizados. | 69 |
| Tabla 20. Aceleración promedio del nivel freático en el acuífero Dr. mora - San José Iturbide. | 71 |

| | |
|---|----|
| Tabla 21. Aceleraciones promedios del nivel freático en el acuífero San Miguel de Allende. | 73 |
| Tabla 22. Aceleración promedio del nivel freático en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja. | 75 |
| Tabla 23. Resultados de estadísticas zonales para clasificación de casos. | 77 |
| Tabla 24. Resumen del análisis de balance de agua subterránea del acuífero LS..... | 78 |
| Tabla 25. Resumen del análisis del balance de agua subterránea del acuífero DMSJ..... | 80 |
| Tabla 26. Resumen del análisis de balance de agua subterránea del acuífero SMA. | 81 |
| Tabla 27. Resumen del análisis del balance de agua subterránea del acuífero CARL..... | 82 |
| Tabla 28. Resumen del valor promedio del balance de agua subterránea por acuífero. ... | 83 |
| Tabla 29. Resumen del balance de agua subterránea para cada acuífero y el Índice de Oscilación del Pacífico Norte América. | 84 |

INTRODUCCIÓN

I.1 ANTECEDENTES

El agua subterránea es aquella parte del recurso hídrico que se encuentra en la zona continental del planeta, alojada en los denominados acuíferos. Un acuífero es un estrato o formación geológica que permite el paso y acumulación de la infiltración del agua en sus poros o grietas, al nivel superior de dicha acumulación se le conoce por el nombre de nivel freático cuando se trata de un acuífero libre, y de nivel piezométrico cuando se trata de un acuífero confinado. Este recurso es aprovechado por el hombre mediante diferentes tipos de obras, como galerías filtrantes, norias y pozos profundos.

En México los acuíferos son las únicas fuentes permanentes de agua en las regiones áridas y semiáridas, que ocupan alrededor del 50% del territorio nacional y sustentan el riego de unos dos millones de hectáreas (poco más de la tercera parte de la superficie total irrigada en el país); suministran cerca del 75% del volumen de agua utilizado en las ciudades, donde se concentran alrededor de 65 millones de habitantes; satisfacen las demandas de agua de la gran mayoría de los desarrollos industriales y abastecen a casi toda la población rural, cerca de 25 millones de habitantes (CONAGUA, 2011).

El panorama actual de las aguas subterráneas en México presenta sobreexplotación en la mayoría de los acuíferos y con esto el descenso constante del nivel freático/piezométrico¹, en adelante se usará el término “nivel del agua subterránea” para referirnos de forma general a ambos niveles freático y piezométrico. CONAGUA (2011) determinó la disponibilidad de agua de 511 acuíferos mediante el cálculo de disponibilidad media anual de agua subterránea, de los cuales hay 162 acuíferos sin disponibilidad de agua, y de estos, 104 están sobreexplotados y 58 tienen descargas naturales concesionadas como agua superficial o comprometidas con el medio ambiente.

En el estado de Guanajuato, la mayoría de sus acuíferos se encuentran sobreexplotados, debido a que la extracción supera la recarga en la mayor parte de toda su extensión territorial. Teniendo una recarga anual de 1 495 millones de metros cúbicos (Mm³) y una extracción anual de 2,791 Mm³, lo que representa un déficit en la cantidad de agua subterránea disponible, de -1,246 Mm³ (SDA, 2009).

En los últimos 70 años, el creciente número de pozos de bombeo de agua subterránea, privados y públicos en el estado de Guanajuato, condujo a sobre concesionar la disponibilidad de agua subterránea; esta asignación excesiva ha llevado a una situación de sobreexplotación (Foster et al., 2004, Wester et al., 2009).

Las presiones de la economía creciente y el aumento de la población contribuyen a una degradación grave del agua subterránea, deterioro de la calidad y una disminución progresiva del caudal base de los ríos, lo que provoca cambios en el patrón de flujo del agua subterránea y grandes aumentos en el costo de extracción (CONAGUA 2013;

¹ En referencia a acuíferos libres o confinados.

Hoogesteger y Wester 2017; Mahlknecht y otros 2006; Navarro de León et al. 2006; Ortega M, 2009).

En general, se acepta que el desarrollo insostenible de las aguas subterráneas en los acuíferos de Guanajuato es causado por un cumplimiento débil de la ley de aguas, programas de electricidad subsidiada y fuertes incentivos económicos para seguir bombeando a pesar de la creciente escasez de agua (Foster et al., 2004, Hoogesteger y Wester 2017, Sandoval 2004, Scott y Shah 2004, Wester et al., 2011).

Guanajuato es el estado de la República Mexicana que encabeza la lista con el mayor número de acuíferos sobreexplotados. En particular, esta investigación centra su atención en la Cuenca Alta del Río Laja, en adelante Cuenca Independencia (CI) para evitar confusión con el nombre de uno de los acuíferos administrativos que la conforman. La Cuenca Independencia cubre una extensión de 6,840 km² y se localiza en la porción nororiental del estado de Guanajuato, donde se observan descensos en el nivel freático que van de 2 m/año a 5 m/año. La dinámica de los sistemas de flujo indica que el tiempo promedio de renovabilidad completa para el agua subterránea en la CI es de aproximadamente 6,000 años, lo que convierte al agua en un recurso vulnerable a su agotamiento, con una renovabilidad muy limitada bajo las condiciones semiáridas de la región (Garfias J., 2004).

Uno de los mecanismos que se han implementado en el Estado de Guanajuato para revertir o aminorar el déficit de agua subterránea en los acuíferos son las Vedas (es decir, la prohibición de pozos nuevos). Sin embargo, estas vedas aplicadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) desde 1952 (CONAGUA, 2010) no han sido del todo efectivas ya que no existe la capacidad para que estas se cumplan (Foster et al., 2004).

También, existen programas de subsidios para modernizar el riego por parte de los gobiernos estatales y federales. Sin embargo, estos programas principalmente han beneficiado a productores corporativos (Hoogesteger van Dijk, 2017).

A esta problemática de sobreexplotación también se suma la fiabilidad de la base de datos del Registro Público Nacional de Derechos de Agua (REPDA), ya que del análisis de esta base de datos es posible encontrar información incorrecta en los registros del área de estudio, donde casi 7×10^6 m³ del volumen de agua concesionada al acuífero Cuenca Alta del Río Laja (acuífero que se localiza dentro de la cuenca CI) se asignó erróneamente (pertenece a otros acuíferos), valor que representa el 19% del déficit medio del período 2008-2015 (Li Yanmei, 2018).

En apoyo para revertir el problema de la sobreexplotación de los acuíferos en el estado de Guanajuato se crean los Consejos Técnicos de Agua Subterránea (COTAS). Estos funcionan como organizaciones auxiliares de acuerdo con la ley de aguas, pero no tienen un mandato legal, y dependen económicamente de la Comisión Estatal del Agua del Estado (CEAG) y la CONAGUA. Los objetivos principales de COTAS son detener la sobreexplotación de las aguas subterráneas y recuperar los niveles de los acuíferos. Hasta la fecha, está claro que COTAS no puede lograr estos objetivos solo. La paradoja es que, con las actuales políticas de subsidio tampoco los administradores de agua estatales y federales, con el poder legal, pueden lograr revertir la tendencia insostenible de descensos del agua subterránea sin el apoyo de las COTAS (Foster et al., 2004, Hoogesteger y Wester 2017, Wester et al., 2009, Wester et al., 2011).

La evaluación de los recursos de agua subterránea y su modelado son fundamentales para la gestión y la planificación. La evolución del nivel del agua subterránea en los acuíferos de Guanajuato se actualiza anualmente por la Comisión de Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG). Algunos COTAS producen materiales de divulgación tales como carteles y revistas para informar al público sobre la crisis del agua subterránea en el Estado de Guanajuato. Sin embargo, estos esfuerzos de divulgación para alertar a las personas sobre la disminución del nivel freático no están bien respaldados debido a que aún no se tiene una total comprensión de cómo funcionan los acuíferos. Existen ejemplos de modelos matemáticos de bases físicas que se han utilizado para simular los acuíferos en el estado de Guanajuato (Foster et al., 2004, Navarro de León 2006, Sandoval 2004); sin embargo, estos no fueron detallados lo suficiente como para evaluar la evolución y la disponibilidad del agua subterránea. En el Estado de Guanajuato existen también ejemplos de empresas que fueron contratadas para realizar estudios de modelización, como los publicados en Lesser y Asociados (1998). Pero, el esfuerzo más significativo fue realizado por el CEAG durante el período 1998-2006 con el Programa de Desarrollo de Modelos de Acuífero (Serra et al., 2005).

Aunque, de forma inherente, cualquier aplicación determinística comparte la misma limitación, la falta de información, problema que limita severamente su uso para la predicción. Las principales fuentes de error señaladas por Chavez et al. (2005) en el programa del desarrollo del modelo acuífero de Guanajuato fueron: 1) Inconsistencias con los niveles de agua subterránea reportados en cada ubicación geográfica; 2) Incertidumbre en los flujos laterales asignados en el modelo a lo largo de los segmentos de contorno; 3) La superficie freática/piezométrica inicial fue asumida para la simulación; 4) La medición de los niveles de agua estaba afectada por el bombeo en pozos cercanos; 5) Las fluctuaciones de alta frecuencia en los niveles de agua observados no son reproducibles por el modelo; 6) Sobreasignación de las tasas de bombeo en los pozos de producción; 7) Exceso o déficit de recarga por área (principalmente por flujos de retorno de riego) en algunas zonas de los acuíferos; 8) Subestimación o sobreestimación de la recarga a través del lecho de corrientes superficiales; 9) Uso de métodos determinísticos para interpolar superficies freáticas/piezométricas; y 10) Incertidumbre en la zonificación y en los valores de los parámetros asociados con las propiedades hidráulicas.

Los resultados de este programa de desarrollo de modelos de acuífero se transfirieron a CEAG, pero sigue siendo incierto si se superarán los obstáculos económicos y técnicos para mejorar y completar las bases de datos con información requerida. A pesar de lo anterior, la red de monitoreo de agua subterránea CEAG-COTAS continúa midiendo los niveles de agua subterránea de los acuíferos de Guanajuato (Chavez et al., 2005).

Esta problemática de falta de información para implementar un modelo determinístico de bases físicas como MODFLOW, y las carencias económicas para sustentar la información que el modelo requiere, es la principal motivación de esta tesis para desarrollar una nueva metodología de gestión y cuantificación de la evolución de la disponibilidad del agua subterránea partiendo de la información que existe y que es económicamente viable mantener actualizada, nos referimos a los niveles de agua registrado en los pozos anualmente. La metodología propuesta incluye el uso de herramientas geoestadísticas (geoespaciales) y de análisis de tendencias en series temporales, que incluye la generación de herramientas para generar mapas de zonas potenciales de pozos ilegales, mapas que

permiten cuantificar espacialmente la disponibilidad del agua y las tendencias de los descensos en el corto y mediano plazo.

I.2 OBJETIVOS

I.2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para cuantificar la evolución de la disponibilidad del agua subterránea, partiendo de información de niveles de agua en pozos, implementando un modelo geoestadístico.

I.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Programar en Python una herramienta para la ejecución automatizada de esta metodología sobre la plataforma de ArcGIS®.
- Generar mapas con la distribución espacial de las velocidades del descenso del nivel freático.
- Generar mapas con la distribución espacial de la aceleración del descenso para definir zonas potenciales donde pueden estar operando pozos ilegales, o pozos que sobrepasen el volumen de agua subterránea concesionado.
- Generar mapas predictivos que permitan analizar los efectos de las tendencias actuales de los descensos de niveles.
- Cuantificar en términos de balance (volumen de agua) el efecto de eventos climáticos como El Niño y La Niña.

I.3 HIPÓTESIS

El Balance del agua subterránea en un acuífero puede ser evaluado con modelos geoestadísticos para evitar los balances hídricos tal como lo plantea CONAGUA, y reducir considerablemente el grado de incertidumbre de la información que requiere un balance basado solamente los niveles de agua en los pozos, información del coeficiente de almacenamiento del acuífero y el volumen de agua natural comprometida.

I.4 JUSTIFICACIÓN

Existe actualmente la necesidad de una metodología que permita apoyar la gestión de la problemática de sobreexplotación en los acuíferos del Estado de Guanajuato. El uso de modelos determinísticos de bases físicas, como MODFLOW, no han sido una solución práctica dada la falta de información que limitan su uso y su capacidad predictiva. Además, se mantiene una limitante económica que sólo permite, entre otras variables físicas, mantener actualizada de forma anual los niveles de agua en los pozos. Teniendo en cuenta este contexto de limitaciones técnicas, económicas y de información, se genera la necesidad de desarrollar una metodología que se pueda implementar con únicamente información de niveles, medidos anualmente, de agua en los pozos de bombeo y piezómetros, y que sea una herramienta de bajo costo y de fácil operación, que se pueda traspasar a CEAG como una herramienta que complemente la gestión y toma de decisiones encaminadas al problema de sobreexplotación de los acuíferos.

I.5 ALCANCE

Desarrollar una metodología, que se traduce en una herramienta programada sobre la plataforma de ArcGIS®, para mejorar la gestión del problema de sobreexplotación de los acuíferos del Estado de Guanajuato.

CAPITULO II: ÁREA DE ESTUDIO

II.1 LOCALIZACIÓN

Guanajuato es el estado de la República Mexicana que encabeza la lista con el mayor número de acuíferos sobreexplotados, entre los que destaca el Cuenca Independencia (CI). La CI cubre una extensión aproximada de 6,840 Km² y se localiza en la porción nororiental del Estado de Guanajuato, abarcando principalmente los municipios de Dolores Hidalgo, San Felipe, San Diego de la Unión, San Luis de la Paz, San Miguel de Allende, Doctor Mora y San José Iturbide (Figura 1).

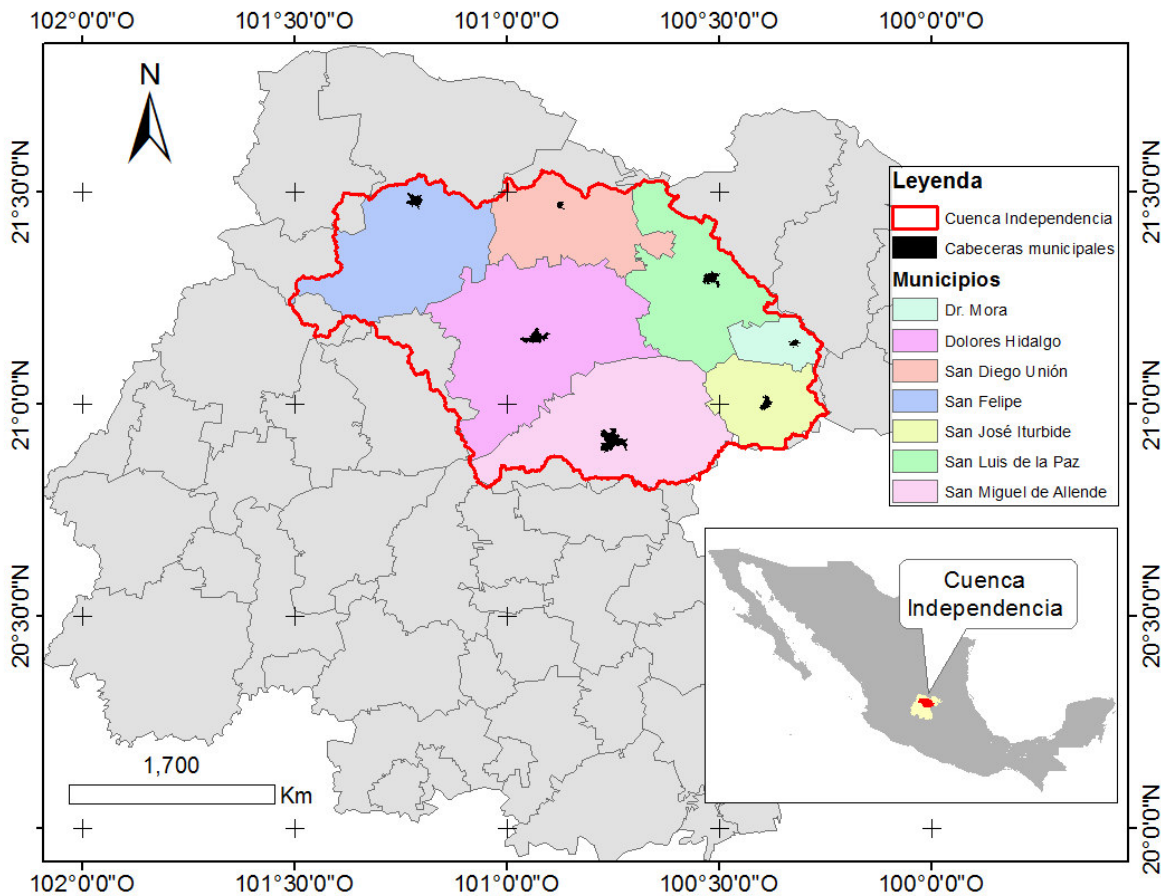


Figura 1. Ubicación de la Cuenca Alta del Río Laja (Cuenca Independencia) y los municipios localizados al interior de esta.

El Acuífero Independencia está conformado por zonas administrativas del agua subterránea de la Comisión Nacional del Agua denominadas como acuíferos, de los cuales los conforman en su totalidad: Laguna Seca (LS); Dr. Mora-San José Iturbide (DMSJ); San Miguel de Allende (SMA); y Cuenca Alta del Río Laja (CARL). Se encuentra conformado solamente en su parte sur por el acuífero Santa María del Río (SMR) (Figura 2).

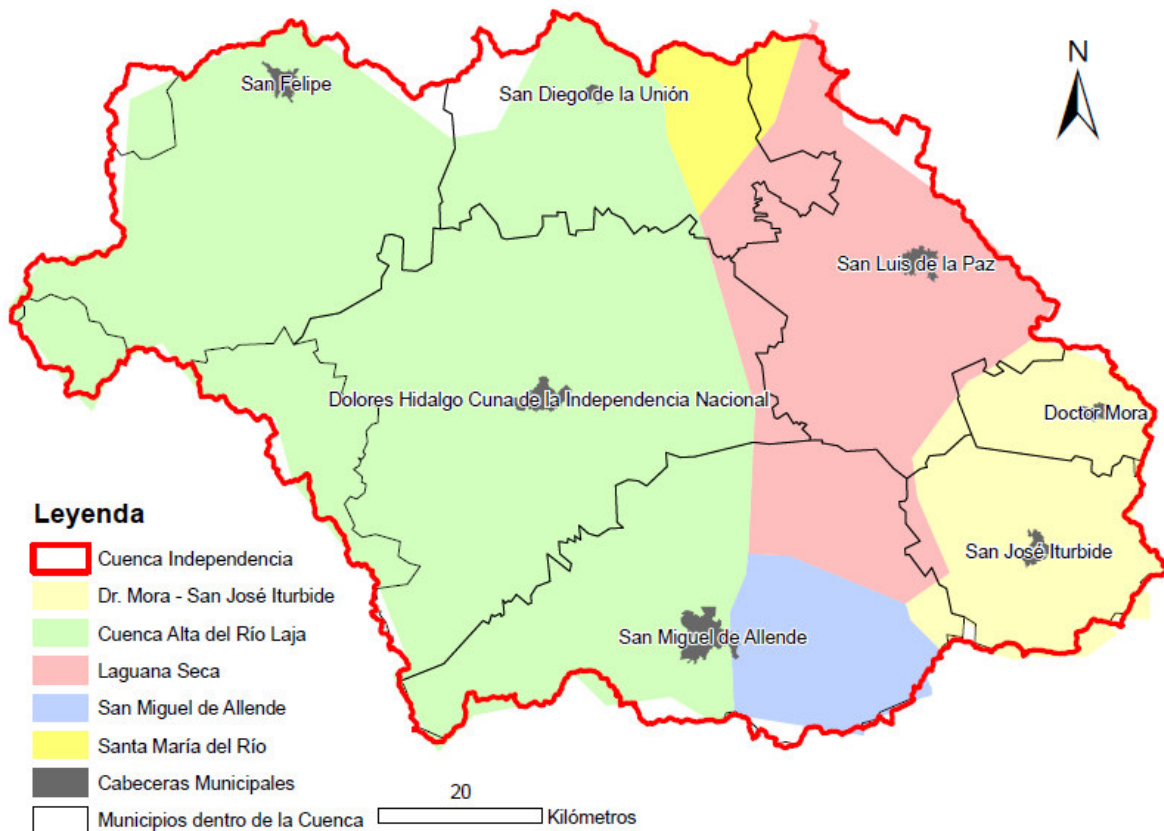


Figura 2. Acuíferos dentro de la Cuenca Independencia.

La Tabla 1 muestra la extensión de las cinco zonas administrativas que comprende el área de estudio.

Tabla 1. Áreas de las zonas administrativas de la Cuenca Independencia.

| Acuífero | LS | DMSJ | SMA | CARL | SMR |
|---|------|------|-----|------|-----|
| Área (Km ²) | 2500 | 783 | 352 | 3000 | 193 |
| Área Cuenca Independencia (Km²) | | | | 6840 | |

La Cuenca Alta del Río Laja es una planicie con una elevación que varía de 1,900 a 2,100 msnm, rodeada por montañas que alcanzan los 3,300 msnm. La CI pertenece al sistema hidrológico Lerma-Chapala y su límite nororiental forma parte de la divisoria continental con la cuenca del río Pánuco.

II.2 FISIOGRAFÍA Y TOPOGRAFÍA

El acuífero se sitúa en la Provincia Fisiográfica de la Mesa Central, localizándose en la Provincia de la Sierra y Llanuras del Norte de Guanajuato. Una pequeña porción del sureste del Acuífero San José Iturbide se encuentra en las Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo. El sur del Acuífero San Miguel de Allende pertenece al Eje Neovolcánico (CONAGUA, 2013)

Se caracteriza por presencia de montañas que forman la Sierra de Guanajuato (cordillera de dirección noroeste-sureste) formando el límite occidental del acuífero con las Sierras de Santa Bárbara o Santa Rosa y el Cubo (límite norte). Estas cierras están integradas por mesetas altas y extensas, predominando rocas volcánicas de tipo tobas riolíticas. Hay presencia de lomeríos extensos entre Dolores Hidalgo y San Miguel de Allende por la erosión de la cuenca alta del Río Laja. Se observan extensos valles al oriente de San Luis de La Paz y entre San José Iturbide y Doctor Mora (CONAGUA, 2013).

La cuenca donde se encuentra acuífero Laguna Seca (LS) forma una gran meseta elevada, que se ha mantenido fuera de la influencia de la erosión de los ríos de cuencas aledañas, debido a que es una cuenca cerrada y predominante plana, por lo cual sus fenómenos erosivos internos son poco notables, ya que las pequeñas corrientes que se forman tienen poco poder de arrastre (CONAGUA, 2013).

Sobre el acuífero Doctor Mora San José Iturbide (DMSJ) forma un gran valle elevado. No se considera como una cuenca cerrada, ya que tiene salida el valle en la porción poniente (CONAGUA, 2013).

Donde se encuentra el Acuífero San Miguel de Allende (SMA) representa ser una subcuenca más elevada al resto de la Cuenca Independencia, esta se compone de un valle plano rodeado de un complejo volcánico conocido como Palo Huérfano.

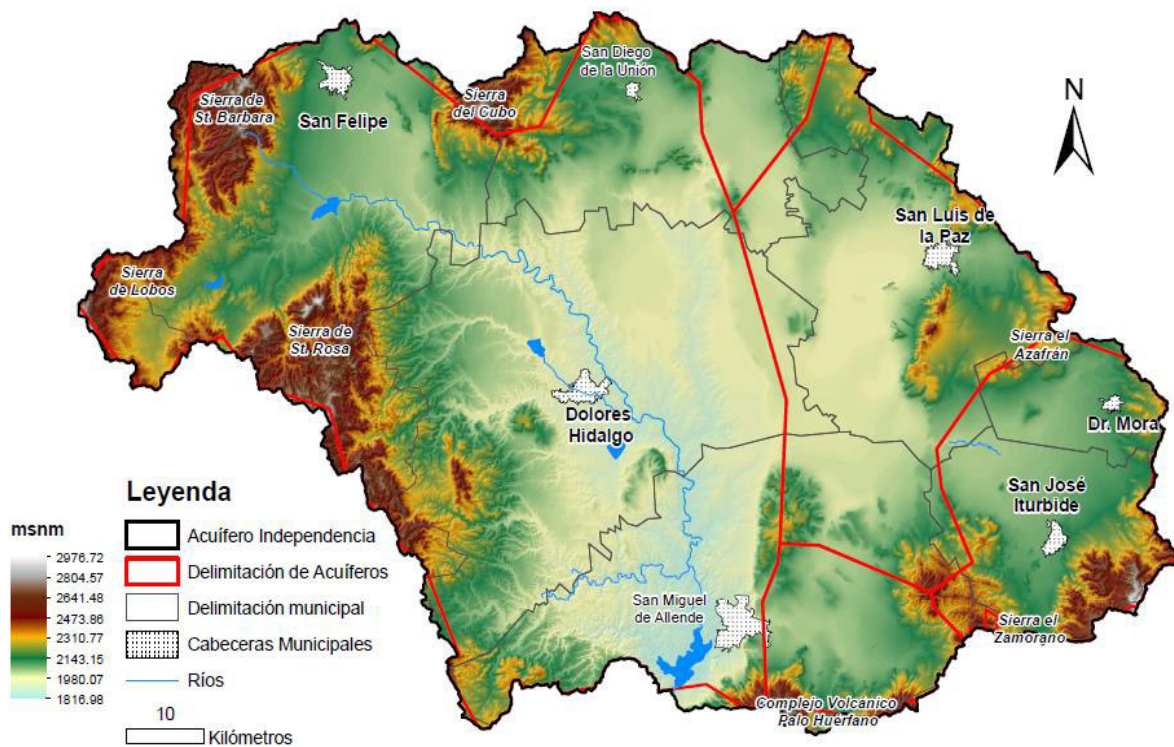


Figura 3. Fisiografía de la Cuenca Independencia.

II.3 HIDROGRAFÍA

El acuífero se encuentra dentro de la región hidrológica “No. 12 Lerma – Chapala – Santiago”, en la cuenca “Río Laja - La Begoña” y en la subcuenca “Río La Laja”.

- Región hidrológica: No. 12 Lerma – Chápala – Santiago
- Cuenca: Río Laja - La Begoña
- Subcuenca: Cuenca Alta del Río La Laja (Cuenca Independencia)

Cada acuífero se encuentra monitoreado por un distinto Consejo Técnico de Agua Subterránea (COTAS). El Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL) por el COTAS Río Laja, Los Acuíferos Laguna Seca (LS) y Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ) por COTAS Laguna seca A.C. y el Acuífero San Miguel de Allende (SMA) por ambos COTAS mencionados.

El cauce más importante del acuífero es el río La Laja, el cual se origina en las sierras de Guanajuato y San Felipe, siguiendo un rumbo al sureste atravesando las poblaciones de Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende, continuando después del acuífero CARL, por Comonfort y después con dirección al poniente rumbo al río Lerma en el municipio de Salamanca, véase la Figura 4.

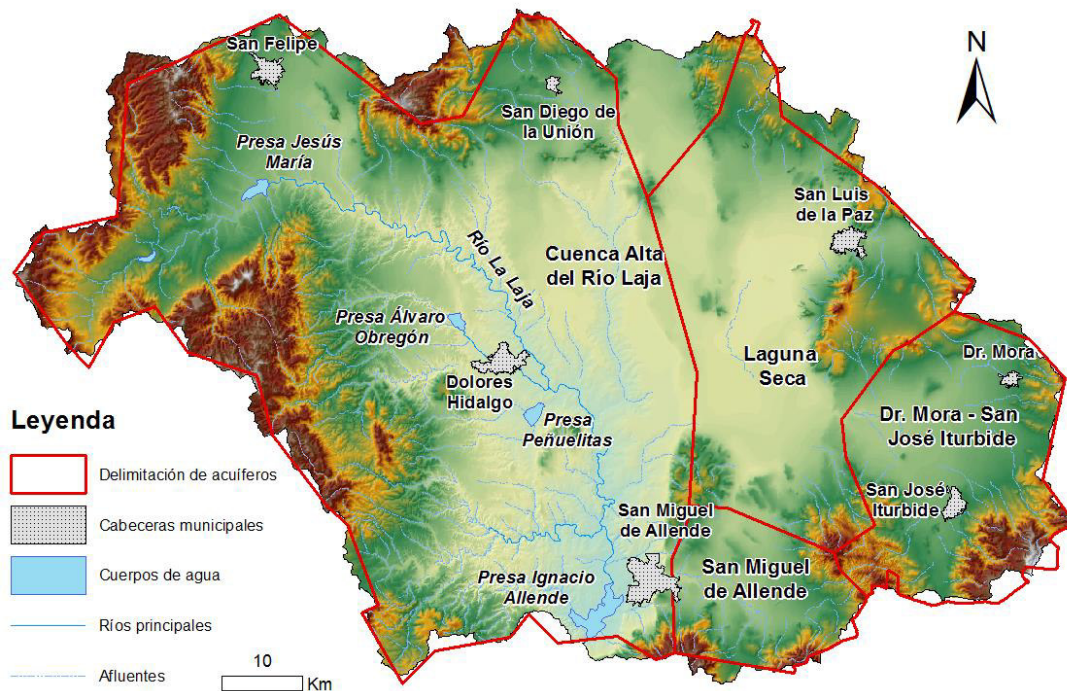


Figura 4. Hidrografía de la Cuenca Independencia.

El río La Laja desde su origen, atraviesa al acuífero con dirección del noroeste para salir del área del acuífero por el sureste trazando una longitud de casi 100 Km (CONAGUA, 2009).

Los aprovechamientos principales de la escorrentía son las presas Ignacio Allende sobre el río La Laja, Peñuelitas sobre el río de la Erre y Álvaro Obregón (el Gallinero) sobre el arroyo Dolores Hidalgo, mostrados en la Figura 4. La primera se localiza a unos 12 km al suroeste de la población de San Miguel de Allende, y aproximadamente a unos 35 km al norte de Celaya, dando origen al Distrito de Riego La Begoña, ya fuera de la zona en estudio. Su capacidad es de 251 Mm³. La presa Peñuelitas se encuentra sobre el río la Erre, se localiza a unos tres kilómetros aguas arriba de la confluencia de este río con el de la Laja, cuenta con una capacidad de 23.8 Mm³ y que riega a unas 1,112 ha. La presa Álvaro Obregón o el Gallinero, ubicada sobre el cauce del río la Laja, se localiza a unos 6 km al Noreste de la población de San Miguel de Allende, tiene una capacidad de 10.9 Mm³ y que riega unas 1,436 ha (CONAGUA, 2009).

II.4 CLIMA

El clima de la Cuenca Independencia varía dependiendo de la elevación, pero en su mayor parte se caracteriza como semiseco. Según la clasificación de Kopen y García cada acuífero tiene las siguientes clasificaciones:

El área de los acuíferos CARL y LS se encuentra un clima semiseco, templado, con lluvias en verano. El acuífero DMSJ pertenece al grupo de climas secos Mientras tanto el acuífero SMA es semiseco, templado, con lluvias en verano. La CI se encuentra bajo condición canicular, que quiere decir un lapso de sequía corto durante el verano (CONAGUA, 2013).

Para entender el comportamiento anual promedio del área se muestra en la Figura 5 los datos promedios de precipitación y temperatura anual tomadas en las cabeceras municipales de Dolores Hidalgo, San Miguel, San Luis, Dr. Mora y San José.

La precipitación es de 510 mm media anual. El mes más seco es febrero con 6.2 mm y la mayor precipitación es en julio con 97.2 mm. Mientras la precipitación media mensual es 42.5 mm. La precipitación varía 90 mm entre el mes más seco y el mes más húmedo. Mientras que la temperatura mínima ocurre en el mes enero de 13.8°C y la temperatura máxima en el mes de mayo de 21°C, la temperatura media anual es de 17.8°C (CLIMATE-DATA.ORG 2019).

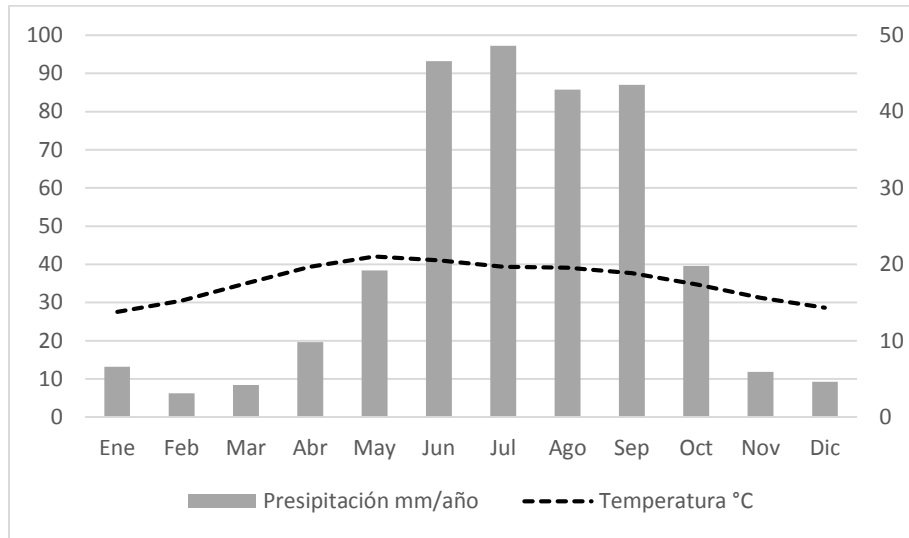


Figura 5. Precipitación y temperatura media anual en la Cuenca Independencia.

La Figura 5 muestra que la temporada de mayor precipitación o temporada de lluvias comprende los meses entre junio y septiembre. La temporada de menor precipitación, temporada de secas, se extiende desde el mes de octubre hasta el mes de mayo.

La precipitación histórica analizada es para el periodo de tiempo 2008-2017 y determinada mediante valores promedios mensuales de las estaciones meteorológicas (red de estaciones meteorológicas COANAGUA) de cada zona administrativa que se muestran en la Figura 6.

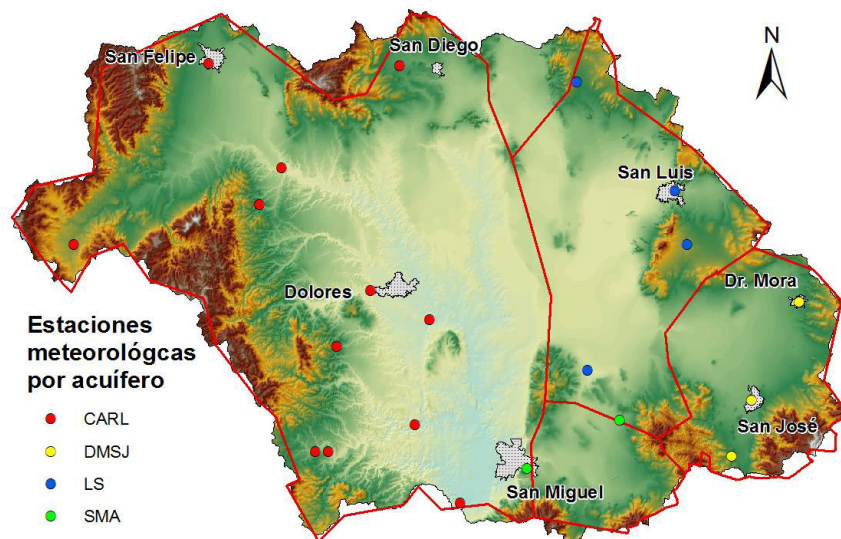


Figura 6. Estaciones meteorológicas de la Comisión Nacional del Agua dentro de la Cuenca Independencia.

La precipitación promedio en la Cuenca Independencia, vista en la Figura 7, muestra que ciertos años se ha tenido diferencias entre la lluvia que ha recibido la cuenca. Además, se puede observar que la precipitación normalmente se encuentra entre los 400 a 600 mm/año con dos periodos extremos, el primero con disminución de la precipitación en el año 2011 menor a los 300 mm y el segundo con un aumento de la precipitación en el año 2015, siendo mayor a los 700 mm. Estos extremos de precipitación se deben a los efectos de La Niña y El Niño respectivamente (CONAGUA, 2017b).

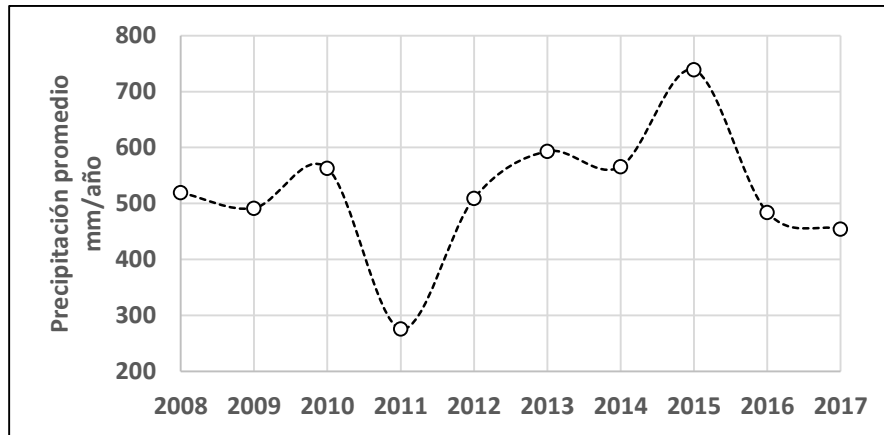


Figura 7. Precipitación media anual de los años 2008 al 2017 en la Cuenca Independencia

La Tabla 2 muestra los valores de precipitación total promedio por acuífero que ha ocurrido dentro del periodo del 2008 al 2017, donde el acuífero DMSJ es el que menor precipitación recibió y el acuífero CARL el que más precipitación recibió.

Tabla 2. Precipitación promedio anual por zona administrativa.

| Acuífero | LS | DMSJ | SMA | CARL | Promedio |
|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Precipitación promedio (mm) | 520.40 | 413.61 | 553.81 | 590.82 | 454.41 |

II.5 GEOLOGÍA

La geología predominante son depósitos lacustres de edad terciaria y cuaternaria, formados por capas de gravas, arenas, arcillas y conglomerados de mediana compactación, con espesores mayores de 200 m en la zona comprendida entre San Miguel Allende y Dolores Hidalgo. Las elevaciones que bordean al valle del río laja al noreste y suroeste están formadas principalmente por rocas volcánicas de tipo riolítico, las cuales también se han detectado mediante perforaciones de pozos, formando el basamento rocoso sobre el que descansan los rellenos del valle. Al poniente de dolores hidalgo, el borde del valle lo constituye la prolongación de la sierra de Guanajuato, y ahí afloran esquistos metamórficos de edad triásica, y pequeños derrames de rocas volcánicas basálticas y andesíticas. Los depósitos aluviales recientes ocupan una gran extensión superficial, constituyendo la cubierta de suelo vegetal en todos los valles, sin embargo, su espesor es reducido, véase la Figura 8 (CONAGUA, 2013).

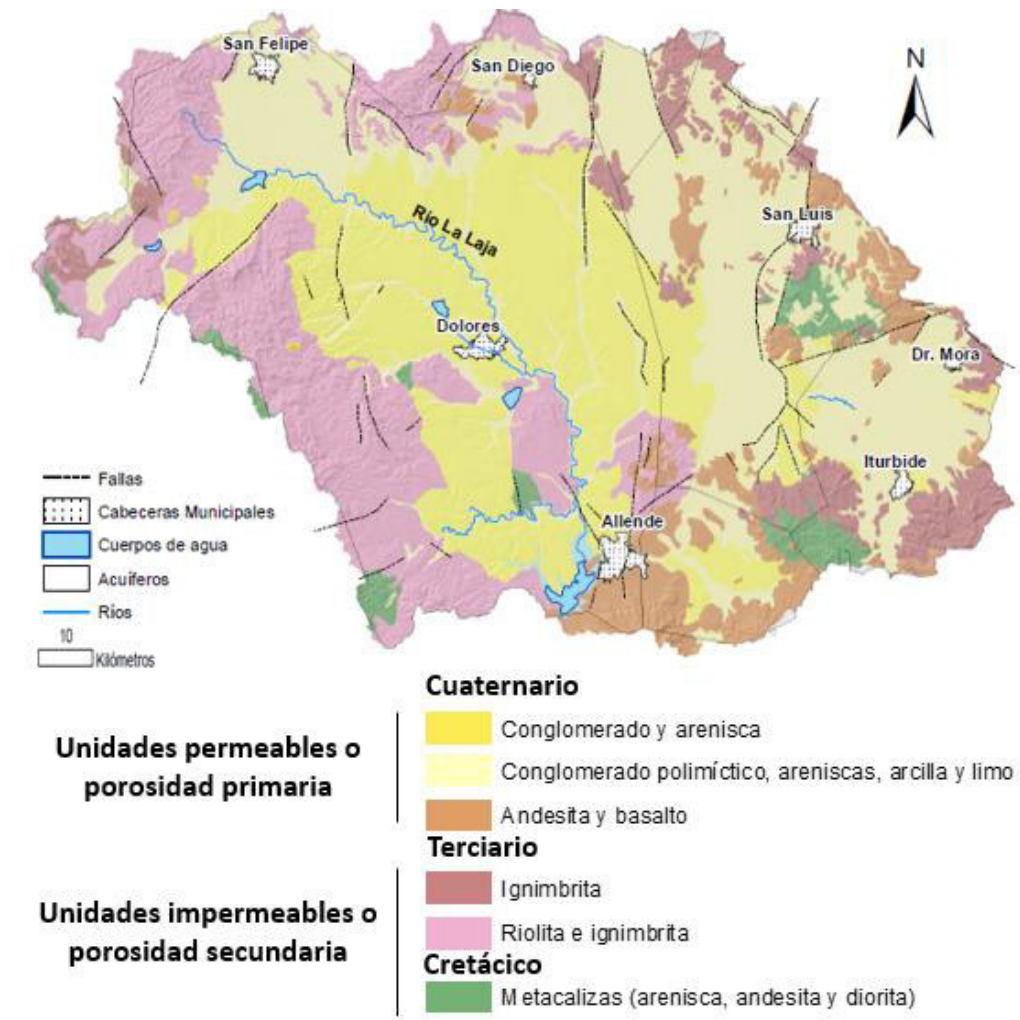


Figura 8. Geología del Acuífero Independencia (Ortega M, 2009).

II.5.1 GEOHIDROLOGÍA

En el acuífero se pueden encontrar dos tipos de unidades geohidrológicas según su permeabilidad, los cuales son:

Unidades Impermeables.- Como rocas prácticamente impermeables se consideran a las de las formaciones siguientes: esquistos (TR-E), lutitas y areniscas (Hs lut-ar) y riolitas (Tr): las que funcionan como barreras y basamento del acuífero del área. **Unidades Semipermeables.-** En esta unidad se agruparon a las rocas de la formación de ignimbritas (Tigea) y al igual que las rocas de las anteriores unidades, define la geometría de los sistemas acuíferos al conformar conjuntamente con aquellas los límites de estos. Así mismo, constituyen una de las principales zonas de recarga al transmitir hacia los acuíferos parte de los volúmenes de agua precipitados sobre ellas, principalmente por los sistemas de fracturas.

Unidades Permeables.- Se agrupan las rocas de las formaciones Calizas (Kcza), Basaltos y Andesitas (Tlged), Tobas híbridas y Arenas (Tbr) Basaltos (Qb), Arenas, - conglomeráticas y Conglomerados (Qar-cg, Qcg) y Depósitos Aluviales y Residuales (Qal, Qre). Los grados de permeabilidad son altos en las calizas, en algunas rocas de los basaltos y las andesitas, en los basaltos y en las arenas conglomeráticas (Kcza, Tigeb, Qb, y Qar-Cg, Qg, respectivamente). En las tobas híbridas, basaltos y arenas conglomeráticas se aloja el acuífero principal; las restantes rocas participan localmente del mismo y todas conforman zonas de recarga (CONAGUA, 2015^a).

II.5.1.1 COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO

El coeficiente de almacenamiento o rendimiento específico (S_y), se define como el volumen de agua liberado de un acuífero libre por unidad de área y unidad de descenso del nivel freático.

CONAGUA en sus diversos estudios ha calculado un coeficiente de almacenamiento promedios para cada acuífero mediante pruebas de bombeo, donde:

Del plano de evolución del nivel estático del acuífero Laguna Seca 1891-1996, se calculó el cambio de almacenamiento, considerando un coeficiente de almacenamiento medio de 0.06. En el acuífero Dr. Mora – San José Iturbide se calculó un valor promedio de rendimiento específico S_y de 0.08. El acuífero San Miguel de Allende los coeficientes medios de almacenamiento varían entre 0.05 y 0.06. Para el acuífero Cuenca Alta del Río Laja los coeficientes medios de almacenamiento varían entre 0.05 y 0.06. Se considera un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.05.

II.5.1.2 Pozos de monitoreo

Para la evaluación del nivel freático se utilizó “La Red de Monitoreo Piezométrico Estatal” de la Comisión Estatal del Agua de Guanajuato (CEAG), la cual cuenta con 924 pozos de observación de la superficie freática (CEAG 2018).

Dado que en la Cuenca Independencia (CI) se extiende en distintas zonas administrativas del agua subterránea de la CONAGUA, se solicitó información, mediante oficio a la CEAG, de los pozos de monitoreo de los acuíferos que conforman la CI. La Figura 9 muestra la distribución de la red de pozos de monitoreo en la CI y en la se clasificaron estos pozos en función de los acuíferos definidos por la CONAGUA.

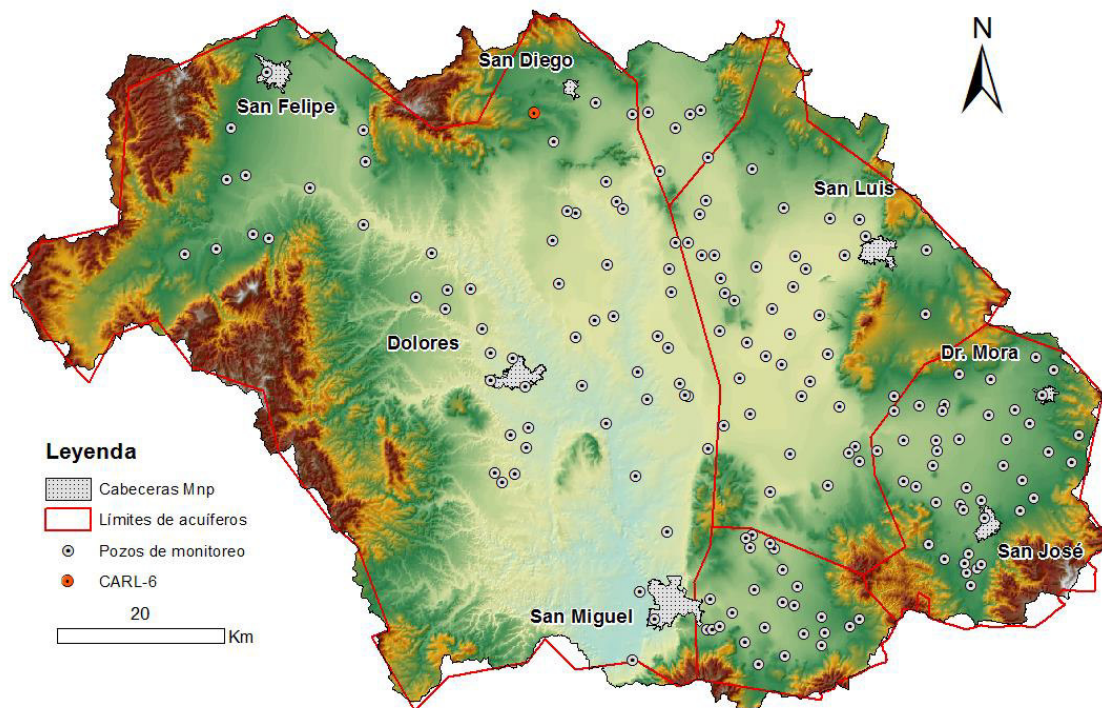


Figura 9. Distribución de la red de pozos de monitoreo de CEAG en el área de estudio.

Los datos de la Tabla 3 muestran que el acuífero CARL cuenta con el mayor número de pozos, pero con un mayor espaciamiento entre ellos debido al mayor tamaño que tiene este acuífero que se extiende a casi a la mitad de la CI, mientras tanto en los demás acuíferos la densidad de la red de pozos de monitoreo es mayor.

De estos 175 pozos de monitoreo se descartó el pozo CARL-6, el cual se representa en color rojo en la Figura 9, más adelante se explica su retiro del análisis, así obteniendo una base de datos de 174 pozos para el presente análisis.

Tabla 3. Número de pozos de monitoreo por zona administrativa en la Cuenca Independencia.

| Acuífero | ID | No. de pozos |
|---------------------------------|------|--------------|
| Laguna Seca | LS | 41 |
| Doctor Mora - San José Iturbide | DMSJ | 42 |
| San Miguel de Allende | SMA | 25 |
| Cuenca Alta del Río Laja | CARL | 61 |
| Santa María del Río | SMR | 6 |
| Total | | 175 |

II.5.1.3 Aprovechamientos de agua subterránea

La Cuenca Independencia está conformado por 4 acuíferos definidos por Comisión Nacional de Agua. Cada acuífero cuenta con un gran número de pozos de suministro para los distintos usos, véase la Figura 10. Estos pozos se encuentran en la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) gestionada por CONAGUA, que gracias a la Ley de Transparencia y la Información Pública se puede acceder a la base de datos desde Internet para su consulta. La presente tesis muestra los aprovechamientos que se cuentan registrados con fecha de corte del mes de noviembre del 2018. Se aclara que, sólo se muestran los pozos cuyas coordenadas geográficas y cuenca a la que están asignados se encuentren dentro de la Cuenca Independencia, ya que existen pozos fuera de estos límites.

La Figura 10 muestra la distribución espacial de los pozos, donde se denota con diferentes colores el uso del aprovechamiento. Asimismo, se muestra la red de monitoreo del nivel freático que la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG), a la cual se nombra como red de pozos piezométricos. Esta es la red de donde proviene la información para determinar el nivel freático para la evaluación de este estudio.

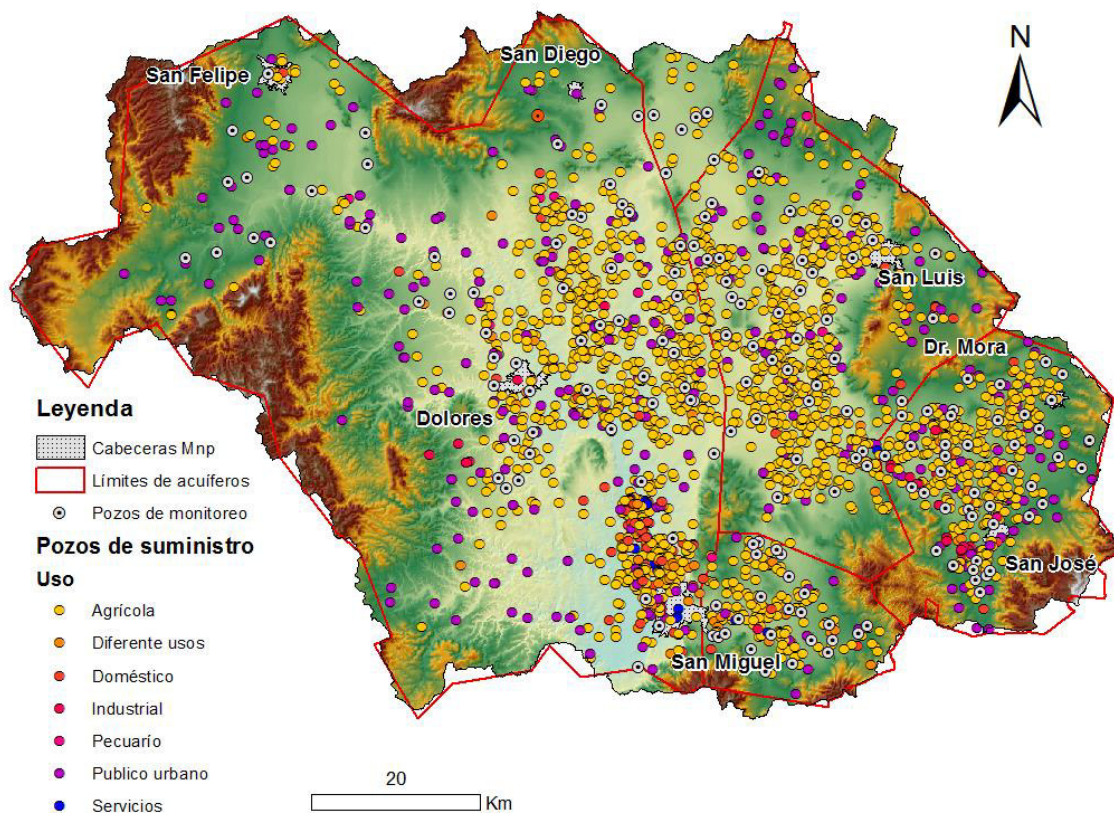


Figura 10. Distribución y tipos de pozos de bombeo según uso (REPDA, 2017).

La Figura 10 muestra que los pozos se concentran principalmente en las zonas de valle de la cuenca CI. Los acuíferos cuentan con una gran cantidad de pozos de explotación de agua subterránea para el uso agrícola, y es de resaltar dos zonas que muestran una menor explotación por pozos agrícolas, el noreste y suroeste del acuífero CARL, donde se encuentran algunos pozos de uso público urbano.

La Tabla 4 muestra el número total de pozos asignados por acuífero.

Tabla 4. Numero de pozos de suministro por acuífero dentro del Acuífero Independencia.

| Acuífero | ID | No. de pozos |
|---------------------------------|-----------|---------------------|
| Laguna Seca | LS | 628 |
| Doctor Mora - San José Iturbide | DMSJ | 418 |
| San miguel de Allende | SMA | 159 |
| Cuenca Alta del Río Laja | CARL | 1059 |
| Santa María del Río | SMR | 15 |
| Total | | 2279 |

Los diferentes usos de los pozos en la Cuenca Independencia se muestran en la Tabla 5. Se observa que casi el 92% del volumen total concesionado es para el uso agrícola, el segundo uso de mayor volumen concesionado, de casi el 4%, es para público urbano el cual pertenece los pozos de suministro de agua potable y el restante para los otros diferentes usos; esto muestra que la mayor entrega de volumen concesionado ha sido para el sector agrario.

Tabla 5. Usos de los pozos de suministro y su volumen concesionado del Acuífero Independencia.

| Uso | No. Pozos | Volumen m³ | % |
|-----------------|------------------|------------------------------|----------|
| Agrícola | 1740 | 341624151 | 91.99 |
| Diferentes usos | 76 | 8413059 | 2.27 |
| Domestico | 66 | 75724 | 0.02 |
| Industrial | 41 | 6331553 | 1.70 |
| Pecuario | 14 | 427425 | 0.12 |
| Público urbano | 320 | 13380067 | 3.60 |
| Servicios | 22 | 1111398 | 0.30 |
| Total | 2279 | 371363377 | |

CAPITULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente tesis se propone un análisis espacial y temporal de la evolución del nivel freático del Acuífero Independencia, esto mediante la construcción de mapas de predicción del nivel freático basados en técnicas matemáticas, específicamente un modelo geoestadístico. Lo anterior con apoyo de una plataforma de procesamiento de información geográfica para su modelación, siendo en este caso el software ArcGIS 10.5.

El enfoque metodológico desarrollado genera un mapa predictivo, con el método Empirical Bayesian Kriging (EBK), que interpola el nivel de agua medido en los pozos de la red de monitoreo de los acuíferos que conforman la CI. A partir de estos mapas de predicción de niveles de agua subterránea se realizó un análisis de tendencias para ajustar un modelo matemático y proyectar niveles freáticos futuros utilizando la herramienta Curve Fit (De Jager y Fox 2013). Para delimitar el área de análisis se consideraron los límites administrativos del acuífero, los mapas de errores de predicción y la geología. Se generaron diferentes mapas para evaluar la variación y la evolución temporal del almacenamiento del acuífero. En resumen, la metodología se puede explicar con la Figura 11.

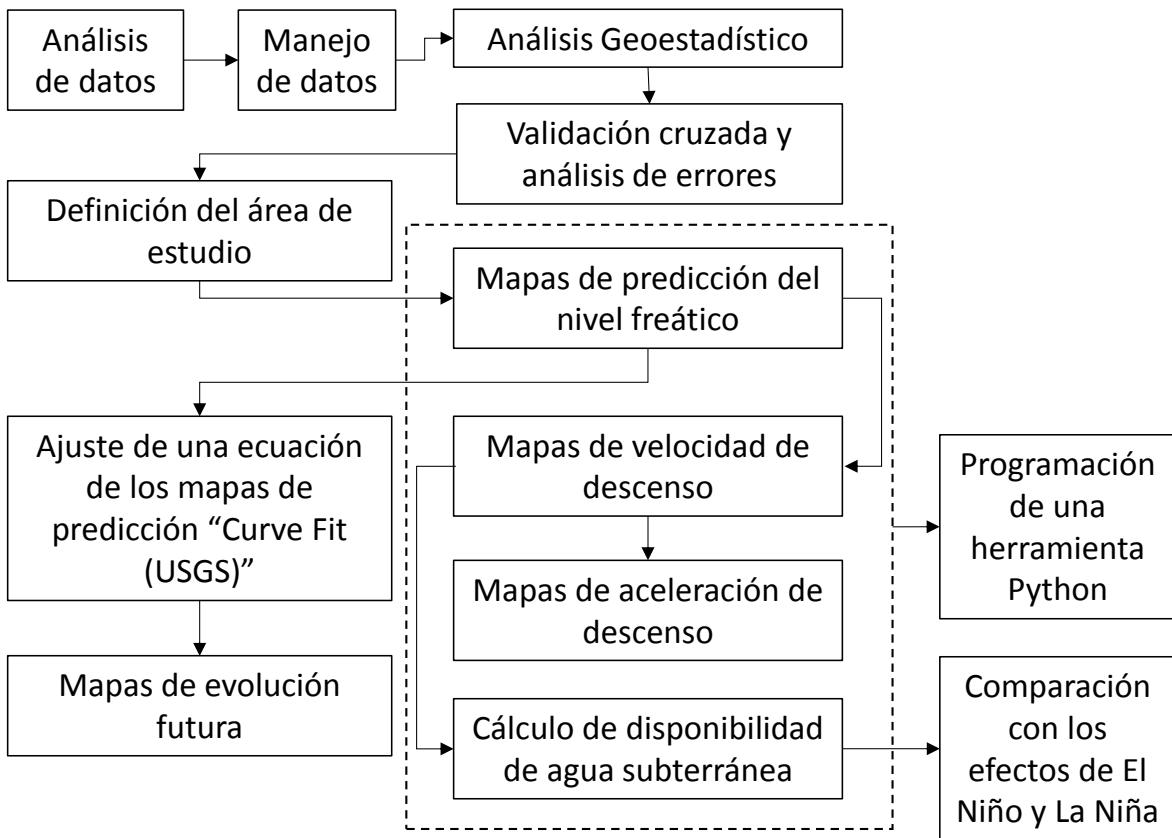


Figura 11. Diagrama del seguimiento de la metodología.

III.1 DATOS DE NIVELES FREÁTICOS

Se solicitó mediante oficio a la Comisión Estatal de Agua del Estado de Guanajuato (CEAG) la base de datos de la red de pozos de monitoreo dentro del área de estudio, que esta tesis llama como Cuenca Independencia (CI). Los datos constan de niveles observados en los

pozos de monitoreo en la época del año de sequía (temporada de secas) y de lluvias tomados anualmente.

Se elaboraron dos oficios para la petición de datos que corresponde a las fechas 20 de abril y 25 de octubre ambos del 2018.

La red de monitoreo proviene de cinco áreas administrativas que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) nombra como acuíferos, donde cuatro de estos acuíferos se encuentran en su totalidad dentro de la CI: Laguna Seca (LS); Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ); San Miguel de Allende (SMA); y Cuenca Alta del Río Laja (CARL). Mientras que sólo una parte del acuífero Santa María del Río (SMR) se encuentra en la CI.

Además, de los datos de la red monitoreo se obtuvo otros datos complementarios para están investigación, como son los datos de la red de usuarios y datos técnicos medidos en pozos de extracción.

III.1.1 Manejo de los datos de la Red de Monitoreo

La base de datos de la red de monitoreo proporcionada por la CEAG consta con las siguientes características para cada pozo:

- Clave de identificación
- Coordenadas de ubicación X, Y (UTM, NAD 1927)
- Elevación superficial (msnm)
- Altura del brocal (cm)
- Profundidades observadas (m) para cada año

La base de datos de la red de monitoreo fue gestionada a través de los Sistemas de Información Geográfica. Para esto los datos fueron procesados en ArcGIS con el sistema de coordenadas original y se verificó su ubicación trasladando los datos a Google Earth, previa transformación de coordenadas a WGS-84, como se muestra en la Figura 12.



Figura 12. Vista área y vista de calle en Google Earth del pozo CARL-228-B-P.

Se verificó que la ubicación de los pozos se correspondiera con instalaciones de bombeo mediante Google Earth, los pozos verificados se habían visitado anteriormente para realizar estudios técnicos y de calidad de agua

En la verificación de la ubicación se modificó el sistema de coordenadas, para ello primero se introdujeron a ArcGIS en el sistema de coordenada UTM NAD 1927, después fueron transformados a UTM WGS 1984, donde Google Earth permitió ratificar su posición correcta, encontrándose los datos en el sistema de coordenadas UTM WGS 1984.

III.1.2 Cálculo de la elevación respectiva al nivel del mar de la profundidad

Los datos de la profundidad fueron tomados con referencia al nivel medio del mar para estimar la elevación del nivel freático en el punto de medición (pozo de monitoreo), esto se calculó con la siguiente formula:

$$\text{Nivel Freático} = \text{Elevación superficial} - \text{Profundidad} - \text{Altura del brocal}$$

III.1.3 Recuperación de datos

La base de datos que se entregó comprendía datos de profundidades del año 2000 al 2017 de los cuales varios años tenían datos faltantes, siendo del año 2000 al 2007 el periodo que contaban con mayor cantidad de datos faltantes. Por lo anterior, se decidió utilizar para el estudio el periodo con mayor cantidad de datos y que resulto en los años del 2008 al 2017.

Se realizó una recuperación de huecos de información, o dato atípico, utilizando la tendencia observada en pozos próximos y en la información del nivel observado en el pozo en cuestión.

Cuando la información de los niveles registrados en el mismo pozo son suficientes para inferir el hueco de información, se procedió mediante el análisis del comportamiento del nivel freático observado en los periodos de secas y lluvias, conociendo la tendencia del periodo de secas se estimó el valor que correspondiera al hueco de información, como se muestra en la Figura 13.

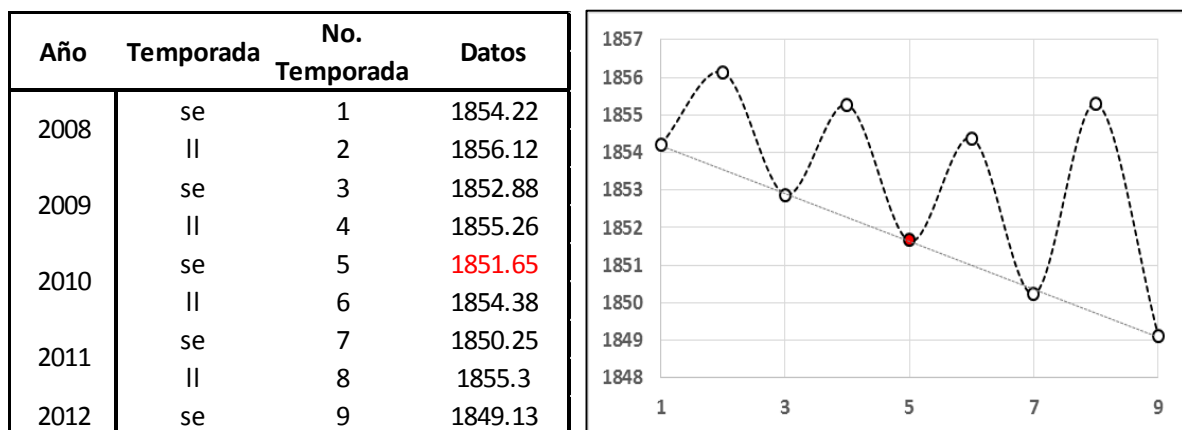


Figura 13. Estimación de hueco de información en el pozo LS-78-P por medio de tendencia de la profundidad por temporadas, en rojo el dato faltante. Izquierda: tabla de datos con el nivel observado en el pozo en lluvia/secas. Derecha: gráfico del comportamiento d del nivel observado durante lluvia y secas.

Además, se presentó el caso de valores atípicos del nivel observado en varios de los pozos de monitoreo. Este valor atípico se comparó con los niveles de agua observados en pozos cercanos para confirmar ese comportamiento. El valor resultó ser atípico, probablemente se tomó la lectura del nivel dinámico, por lo que se procedió cómo si se tratara de un dato faltante pero considerando la tendencia del nivel observado en los pozos más cercanos, esta tendencia se promedió (pendiente) y se aplicó al dato del año anterior faltante para así obtener una estimación del valor mostrado en color rojo en la Figura 14.

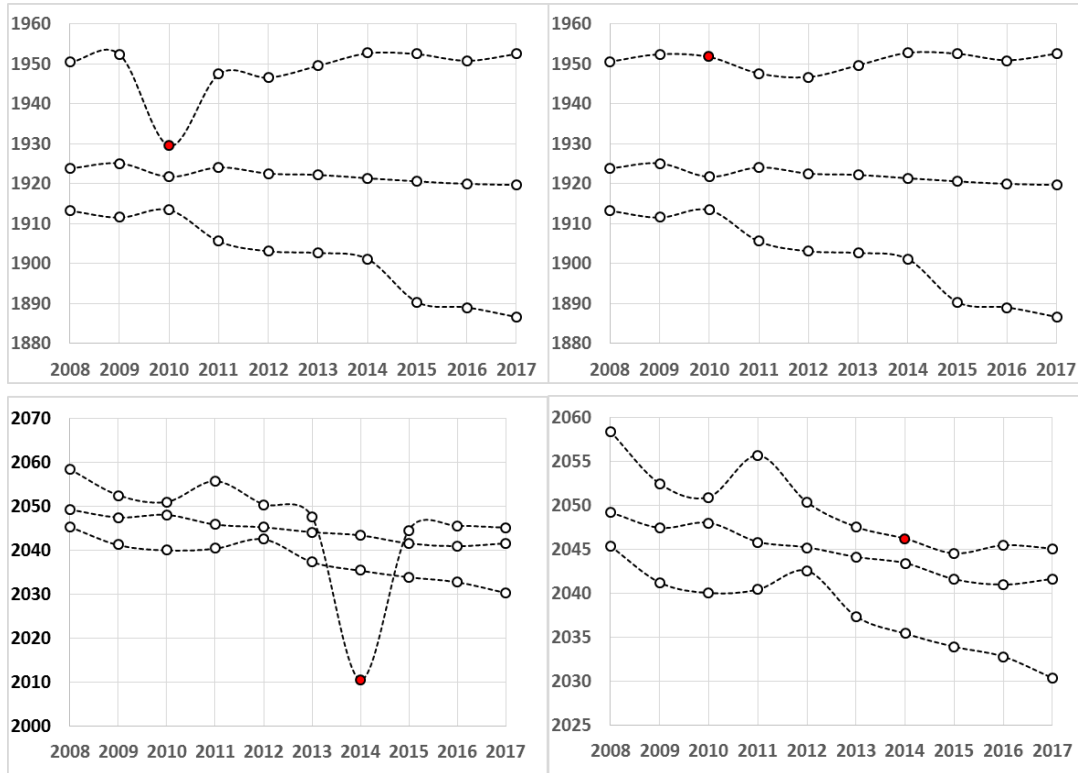


Figura 14. Dato de profundidad atípico modificado mediante uso de la tendencia promedio de los pozos cercanos, izquierda hidrograma original y derecha hidrograma con nuevo valor del dato atípico (punto rojo).

III.2 ANÁLISIS DE DATOS

III.2.1 Estadística descriptiva

En el análisis exploratorio se estudia los datos muestrales sin tener en cuenta su distribución geográfica. Sería una etapa de aplicación de la estadística que consiste en el cálculo de la estadística descriptiva que incluyen la media, los valores mínimo y máximo, la desviación estándar (SD) y el coeficiente de variación (CV). Además, se consideró el uso de pruebas de normalidad para cada conjunto de datos del nivel de agua observado en los pozos de monitoreo.

También, se utilizaron histogramas para complementar el análisis de la distribución del conjunto de datos. Un histograma sirve para obtener un panorama de la distribución de la población de los datos y gráficamente visualizar si los datos siguen una forma de campana de Gauss, lo cual está relacionado con una distribución normal.

El programa ArcGIS se encuentra la herramienta Geostatistical Analyst (Análisis Geoestadístico), esta cuenta con una herramienta de exploración de datos que elabora un histograma y calcula estadísticas descriptivas. En la Figura 15 se presenta un ejemplo del histograma que genera ArcGIS.

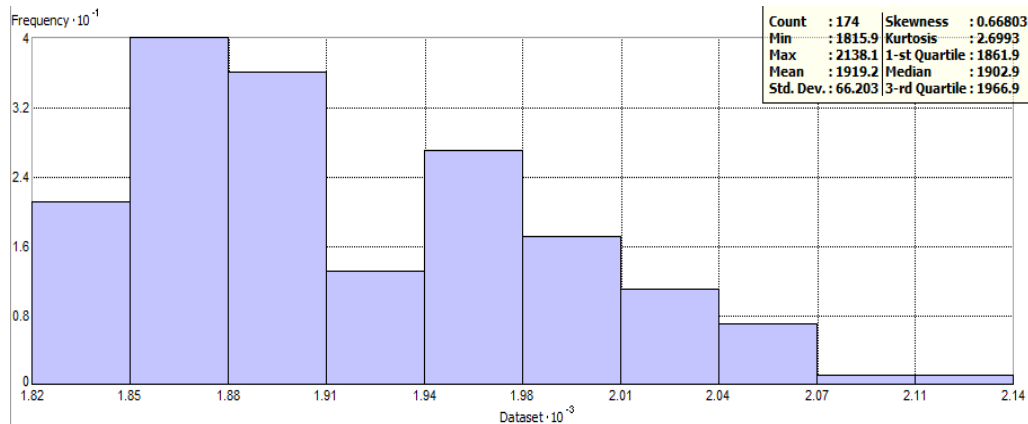


Figura 15. Histograma con valores medios y estadísticos de una serie de datos del nivel freático.

Los estadísticos descriptivos utilizados en el análisis exploratorio son:

- Media: es el valor promedio de un conjunto de datos numéricos.
- Máximo: valor máximo de un conjunto de datos.
- Mínimo: valor mínimo de un conjunto de datos.
- Mediana: es un estadístico de posición central que parte la distribución en dos.
- Desviación estándar: es una medida estadística que nos informa acerca de la dispersión relativa de un conjunto de datos.
- Curtosis: es una medida estadística, que determina el grado de concentración que presentan los valores de una variable alrededor de la zona central de la distribución de frecuencias.
- Asimetría o sesgo: indicador que permiten establecer el grado de simetría (o asimetría) que presenta una distribución de probabilidad.
- Histograma: es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados.
- Cuartiles: son los tiles que se multiplican por un cuarto de un conjunto de datos.

Estos valores son importantes para evaluar si los datos tienen una distribución normal. Algunas reglas a considerar son: la media y la mediana deben coincidir o estar próxima una de otra; la desviación estándar (Std. Dev.) de la media son los parámetros que determinan una distribución normal y este primero determina el grado de apuntamiento de la curva. La curtosis (Kurtosis) caracteriza la forma de la distribución de las frecuencias y esta calcula cuánta relación de apuntamiento tiene la distribución normal de nuestra variable con el grado de apuntamiento de una distribución gaussiana, donde la curtosis igual a 3 representa la distribución normal. Mientras tanto el sesgo (Skewness) mide el grado de asimetría de la distribución con respecto a la media, donde su valor 0 estaremos hablando de una distribución normal, si el valor es negativo se dice que existe un sesgo a la izquierda y si es positivo el sesgo es a la derecha.

III.2.2 Prueba de normalidad

Para cuantificar y comprobar si los datos son una distribución normal se utilizó la prueba de Kolmogorov - Smirnov. sirve para verificar si las puntuaciones que se obtiene de la muestra siguen o no una distribución normal (Normadiah 2011). El valor resultante (valor p) se evaluó con una significancia del 5% o 0.05, si es mayor a este valor ($p > 0.05$) se acepta la hipótesis de nula de similitud con una distribución normal, esto quiere decir que se sigue una distribución normal. Esta prueba se realizó con el apoyo del programa estadístico *SigmaPlot*.

III.3 ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

La geoestadística comprende a un conjunto de herramientas y técnicas que sirven para analizar y predecir los valores de una variable que se muestra distribuida en el espacio o en el tiempo de una forma continua (Moral, F., 2004)

La información del nivel del agua subterránea y los métodos geoestadísticos se usan comúnmente para diferentes propósitos: revelar la estructura espacial y temporal de la fluctuación del nivel del agua subterránea (Ahmadi y Sedghamiz 2007; Chen y Fenag 2013); detectar regiones críticas donde se necesita más atención para el uso sostenible del agua subterránea (El-Fadel et al., 2014; Thomas y Famiglietti, 2015); estimar el descenso del nivel del agua subterránea y las fluctuaciones del nivel freático con baja incertidumbre tanto espacialmente como temporalmente (Sun et al., 2009; Ta'any et al., 2009); crear un mapeo de contorno óptimo de los niveles de agua subterránea para una gestión efectiva y decisiones de monitoreo (Ahmadi y Sedghamiz 2007; Béjar-Pizarro et al., 2017; Kumar 2007; Varouchakis e Hristopulos 2013a); y generar mapeos de vulnerabilidad para la planificación ambiental y la toma de decisiones utilizando métodos de índice junto con el análisis espacial basado en SIG y como una opción para soluciones costosas poco prácticas (El-Fadel et al., 2014; Varouchakis e Hristopulos 2013b). Según los resultados obtenidos por las referencias citadas, la geoestadística es una solución viable para interpolar la superficie freática y poder lograr los objetivos que se establecen para la presente tesis.

III.3.1 Semivariograma

El análisis geoestadístico se basa en un método de interpolación de una variable regionalizada y para esto se usa un análisis estructural. Esto es un estudio de la continuidad espacial de la variable. Se calcula el semivariograma, u otra función que explique la variabilidad espacial, y se ajusta al mismo una curva teórica (Moral, F., 2004).

El semivariograma representa en el eje vertical la diferencia entre cada par de valores como semivarianzas $\gamma(h)$ y en el horizontal las distancias que separan a los pares de valores. Este primer gráfico es el semivariograma empírico, véase la Figura 16.

Para realizar una interpolación eficaz se ajusta una curva teórica a los puntos que forman el semivariograma empírico. La aplicación principal es la predicción de los valores de atributo en las ubicaciones que no fueron muestreadas. Esto se le conoce como Krigeado o interpolación tipo Kriging. Debido a que la distribución de los datos del semivariograma no tiene una forma continua o constante debe ajustarse una curva teórica la cual pueda abarcar las zonas de distribución no muestreadas, esto se muestra como una línea de valor

promedio de la nube de datos, conocida como curva teórica, véase la Figura 16 (ESRI 2016a).

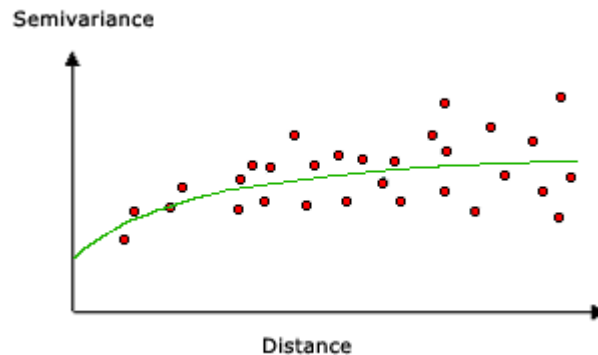


Figura 16. Semivariograma empírico con una curva teórica ajustado.

III.3.2 Empirical Bayesian Kriging

Krivoruchko y Gribov (2014) mejoraron para ESRI® los métodos geoestadísticos clásicos (que usan solo un semivariograma) con un Kriging bayesiano empírico (EBK, por sus siglas en inglés). La diferencia fundamental es que los métodos clásicos de kriging estiman un semivariograma que se considera el verdadero semivariograma de los datos observados. Al no tener en cuenta la incertidumbre de la estimación del semivariograma, los métodos clásicos subestiman los errores estándar de las predicciones (Basu 2016). Mientras tanto, EBK itera n veces para generar múltiples semivariogramas y dar cuenta del error introducido al estimar un modelo de semivariograma,

Las ventajas adicionales de EBK sobre los modelos de kriging clásicos son (Krivoruchko 2012; Krivoruchko y Gribov 2014): el modelo permite el uso de datos moderadamente no estacionarios; permitir un error de medición variable; si es necesario, el método puede transformar los datos para que se ajusten a una distribución Gaussiana localmente; en el caso de grandes conjuntos de datos, los datos de entrada se pueden dividir en subconjuntos de tamaño específico que pueden solaparse o no; en cada subconjunto, se evalúa la distribución del semivariograma y la predicción se genera a partir de uno o más subconjuntos.

Una vez que los datos se dividen en subconjuntos de un tamaño específico (100 puntos por subconjunto por defecto):

- 1) Se estima un semivariograma a partir de los datos en el subconjunto;
- 2) Usando este semivariograma, los datos nuevos se simulan incondicionalmente en cada una de las ubicaciones de datos de entrada. Se estima un nuevo modelo de semivariograma a partir de los datos simulados para cada iteración, y luego se actualiza cada iteración del modelo bayesiano;
- 3) Los semivariogramas de todas las iteraciones se trazan juntos para crear una distribución de semivariogramas sombreados por densidad. Además, la mediana de la distribución de semivariogramas del espectro, los percentiles 25 y 75 y las semivarianzas empíricas se mantiene en el mismo gráfico, véase la Figura 17.

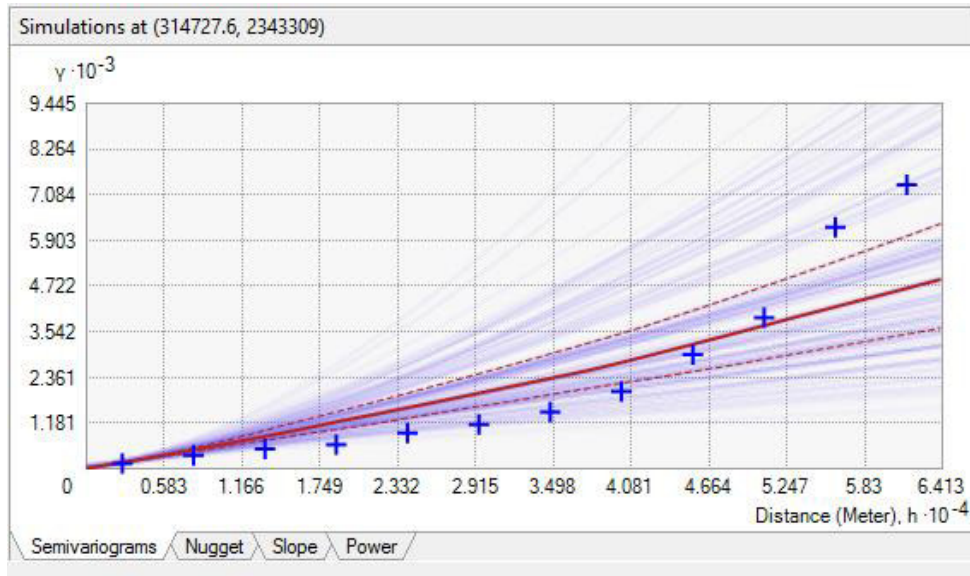


Figura 17. Semivariograma que usa el EBK donde: los Semivariogramas empíricos simulados se muestran como líneas azules sombreadas por densidad (cuantas más líneas azules pasan por el mismo sitio el azul mostrado es más oscuro) y las semivarianzas empíricas se muestran mediante cruces azules. La mediana de todos los semivariogramas azules se muestra en color rojo continuo y los percentiles 25 y 75 se muestran con líneas discontinuas de color rojo.

Algunas configuraciones en el software ESRI ® están disponibles para EBK, y su comportamiento es el siguiente (ESRI 2016): si se aplica la transformación (Normal Score Transformation), el modelo kriging cambia de una función aleatoria intrínseca a un modelo kriging simple con modelos de semivariograma adicionales habilitados; cuando la transformación está configurada en *None*, los modelos *Power* (por defecto), *Linear* y *Thin Plate Spline* se habilitan; si la transformación se establece como *Empirical* o *Log Empirical*, se activan los modelos *Exponential* (predeterminado), *Exponential Detrended*, *Whittle*, *Whittle Detrended*, *K-Bessel* y *K-Bessel Detrended*. Para aplicar una eliminación de tendencia de primer orden las curvas teóricas que terminan con *Detrended* son la opción a elegir.

La herramienta *Empirical Bayesian Kriging* (EBK) se localiza en el *Geostatistical Wizard* que es parte de la caja de herramientas *Geostatistical Analyst*, EBK cuenta con un interfaz gráfica (Figura 18) donde existe una serie de parámetros modificables que sirven para configurar el tamaño de los subgrupos de datos, el tipo de transformación y curva teórica de ajuste al semivariograma empírico, así como la configuración del método de búsqueda de los vecinos más cercanos.

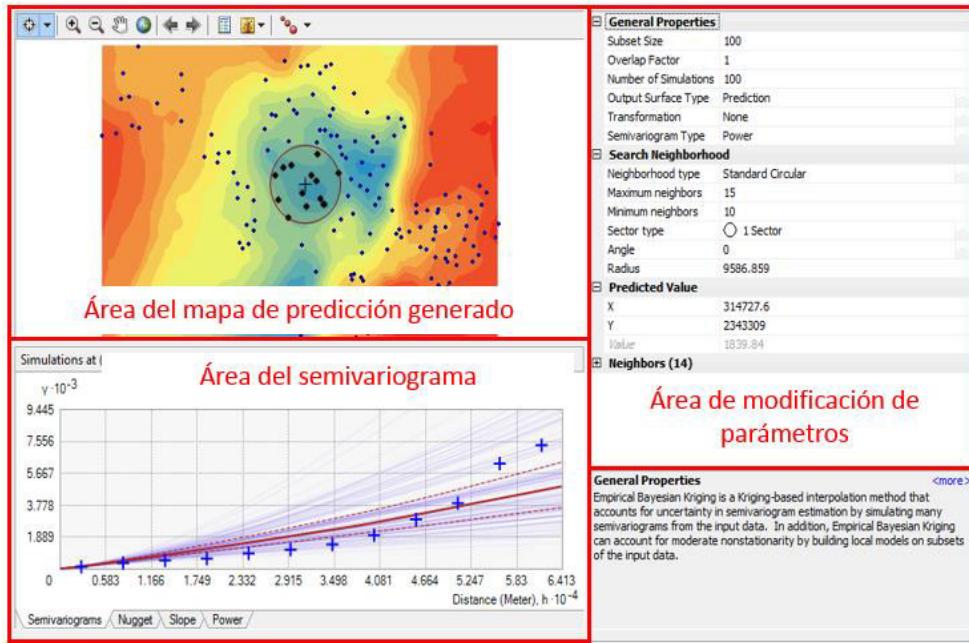


Figura 18. Interfaz de la herramienta Geostatistical Wizard.

Esta interfaz muestra además una ventana con los semivariogramas simulados y otra más con el mapa de predicciones generado.

El objetivo es encontrar una configuración donde las cruces azules mostradas en la ventana de los semivariogramas simulados se mantengan, lo mejor posible, dentro de los límites de los percentiles 25 y 75 mostrados como líneas rojas discontinuas.

Una descripción más detallada de los parámetros de las distintas propiedades del modelo geoestadístico EBK se muestran a continuación en la Figura 19:

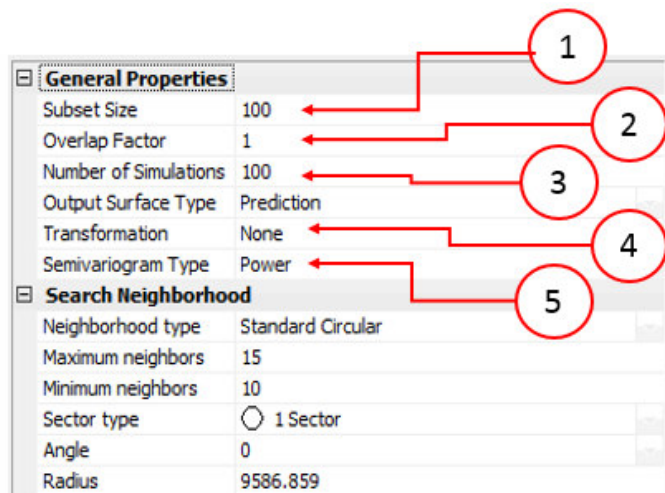


Figura 19. Área de modificación de parámetros.

- 1) Tamaño de subconjunto (Subset Size), especifica el número de datos que contendrá cada subconjunto.
- 2) Factor de superposición (Overlap Factor), permite controlar la superposición entre los subconjuntos.
- 3) Número de simulaciones (Number of Simulations), controla cuántos semivariogramas se simularán en cada subconjunto.
- 4) El Kriging bayesiano empírico ofrece la transformación (Normal Score Transformation) hacia una distribución gaussiana con las siguientes opciones: *Empirical* y *Log Empirical*
- 5) Permite ajustar el tipo de semivariograma (Semivariogram Type).

III.3.3 Validación cruzada

El proceso de validación cruzada es implementado por ArcGIS en los modelos geoestadísticos para estimar distintos errores de predicción y con ellos poder evaluar la variabilidad de la predicción. Este proceso de validación consiste en extraer un valor observado y predecirlo con el resto de los valores, una vez predicho el valor extraído este es devuelto, este proceso se repite para cada valor observado. De las diferencias entre los valores observados y los valores predichos se evalúan distintos errores de predicción, de los que a continuación se muestran las ecuaciones:

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \quad \text{Ec. 1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad \text{Ec. 2}$$

$$ASE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma^2(y_i)} \quad \text{Ec. 3}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i) / \sigma(y_i) \quad \text{Ec. 4}$$

$$RMSSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(y_i - x_i) / \sigma(y_i)]^2} \quad \text{Ec. 5}$$

Donde ME es el error medio, RMSE es el error cuadrático medio, ASE es el error estándar promedio, MSE es el error estándar estandarizado y RMSSE es el error estándar cuadrático de raíz. Y es el valor simulado, es el valor observado, es la desviación estándar.

Para la selección del modelo que mejor predice el nivel freático observado se aplicaron los criterios mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Reglas de validación cruzada para verificar el ajuste del modelo.

| Verificación | La variabilidad de la verificación es |
|---------------------------------------|--|
| $ASE \approx RMSE$ y $RMSS \approx 1$ | Correctamente evaluado |
| Sí $ASE > RMSE$ y $RMSS < 1$ | Sobreestimación |
| Sí $ASE < RMSE$ y $RMSS > 1$ | Subestimado |
| $ME \approx 0$ y $MSE \approx 0$ | Evaluado correctamente. Sin embargo, este valor depende de la escala de los datos. |

III.4 DEFINICIÓN DEL ÁREA DE ANÁLISIS

Una excelente característica de los modelos geoestadísticos es la posibilidad de estimar la incertidumbre asociada con las predicciones interpoladas de la variable que se trabaja, en este caso el nivel freático. Dicha incertidumbre se representa en un mapa de errores de predicción estandarizados, el error se mide en unidades de metros.

El área de análisis representa una parte de la superficie modelada donde la incertidumbre de predicción es menor y no compromete el cálculo del Balance de agua subterránea.

Para delimitar el área de análisis se usó el mapa de error de predicción estandarizado del primer año modelado para identificar las zonas de menor incertidumbre, el mapa de geología y las fallas geológicas para mantener el área de análisis, en la medida de lo posible, sobre unidades permeables o porosidad primaria y las fallas como límites naturales. Finalmente, se utilizaron los límites administrativos de los acuíferos para mantener el área de análisis dentro de estos límites.

El proceso para delimitar el área de análisis se puede resumir en los siguientes puntos:

1. Se crearon isóneas de error para identificar una cota error mínima que no sobrepase los 20 metros de error de predicción estandarizado.
2. Se utilizó la geología y la topografía para definir el límite del acuífero, donde se procuró que el área de análisis se mantuviera sobre el acuífero granular dejando fuera zonas de montaña o materiales consolidados.
3. Se usó las fallas geológicas como límites naturales del acuífero.

4. En el caso de las áreas dentro de los acuíferos definidos por CONAGUA, se evitó no salir del área de dichos acuíferos.

III.5 EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL NIVEL FREÁTICO

Se realizaron mapas anuales de velocidad del nivel freático evaluando la diferencia entre los mapas de predicción del nivel freático de años consecutivos. Estos mapas tienen unidades de m/año y reflejan la velocidad con la que los niveles freáticos cambian anualmente.

Los mapas de velocidad se usan comúnmente para definir la variación del nivel freático con respecto a un tiempo dado. Además, si se conoce el coeficiente de almacenamiento del acuífero libre, en este caso el rendimiento específico (S_y), y la superficie del área de análisis, el balance anual puede evaluarse en términos de volumen por año.

III.6 EVALUACIÓN DE LA ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

Por otro lado, los mapas de aceleración del nivel freático se evaluaron como el cambio de la velocidad del nivel freático respecto del incremento del tiempo (d^2h/dt^2). Estos mapas de aceleración proporcionan información nueva que es de gran interés en la gestión del acuífero, ya que permiten identificar zonas cambiantes de la aceleración del nivel freático del nivel freático que no son visibles en los mapas de velocidades. Las zonas con una velocidad y aceleración negativas tienen implicaciones importantes en la gestión del agua subterránea, ya que puede explicarse por una mayor extracción de agua de los usuarios existentes o bien por nuevos pozos ilegales, aunque también puede deberse a un cambio de las propiedades hidrodinámicas del acuífero que reduzcan su capacidad para transmitir o almacenar agua. Además, a partir de los mapas de aceleración, en un futuro los trabajos se pueden enfocar en buscar posibles relaciones entre la calidad del agua y la intensidad de explotación del acuífero. Finalmente, la aceleración promedio de un período de varios años puede funcionar como un índice para definir si existe una tendencia a mejorar o empeorar la recuperación de los niveles freáticos en el acuífero.

III.7 CLASIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

Clasificar los mapas de velocidad y aceleración permite identificar los siguientes cuatro casos posibles que se muestran en la Figura 20 y a continuación se describen cada uno de ellos:

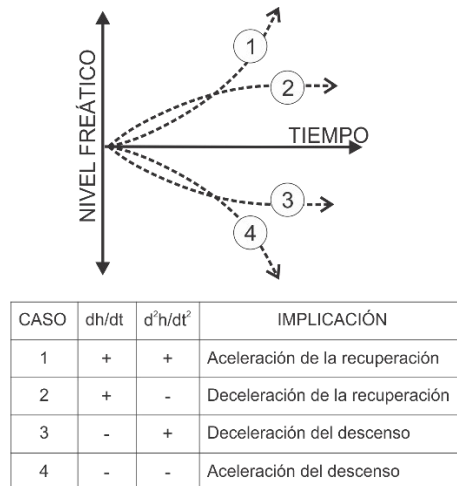


Figura 20. Casos de las implicaciones de la clasificación de la velocidad y aceleración.

Caso 1. Aceleración de la recuperación: la velocidad del nivel freático es positiva (recuperación) y la aceleración también es positiva (la recuperación es cada vez mayor)

Caso 2. Deceleración de la recuperación: la velocidad de del nivel freático es positiva (recuperación) y la aceleración es negativa (la recuperación está cambiando hacia descenso).

Caso 3. Desaceleración del descenso: cuando el valor de la velocidad es negativo (descenso) y el valor de la aceleración es positivo (el descenso está cambiando hacia recuperación).

Caso 4. Aceleración del descenso: este se genera cuando el valor de la velocidad es negativo (descenso) y el valor de la aceleración también tiene signo negativo (el descenso se está acelerando).

Con la clasificación anterior se pueden interpretar los mapas de velocidad y aceleración de los niveles freáticos presentados en el apartado de resultados desde el año 2008 al 2017.

III.8 EVALUACIÓN DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA SUBTERRÁNEA

Con base en estudios técnicos realizados por CONAGUA y publicados en el Informe Oficial de la Federación (CONAGUA 2009, CONAGUA 2013, CONAGUA 2015a), la disponibilidad anual promedio de agua para los acuíferos de la CI es conocida para los períodos del 30 de septiembre de 2008, 31 de marzo de 2013 y 30 de junio de 2014. La metodología implementada por CONAGUA para evaluar la disponibilidad de agua sigue la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (actualizada con la NOM-011-CONAGUA-2015), que establece una relación de balance hídrico que implica la recarga total promedio anual, la descarga natural comprometida y el volumen anual de extracción de agua subterránea.

Sin embargo, la correcta evaluación de la disponibilidad de agua subterránea debe tener en cuenta además otros factores sociales, ambientales, económicos, técnicos, de calidad del agua, legales, de cantidad, entre otros (Barlow 2002).

La estimación que realiza CONAGUA se enfoca principalmente en la cantidad de agua que se puede extraer sin tener en cuenta otros factores, y permite que la extracción sea igual o

mayor que la recarga total (recarga natural más la recarga inducida). Permitir que la extracción sea igual o mayor que la recarga total al acuífero tiene repercusiones negativas bien conocidas relacionadas con la minería de aguas subterráneas.

Entonces, una alternativa para evaluar el balance que desarrolla CONAGUA de forma indirecta son los mapas de velocidad del nivel freático, ya que a partir de estos mapas es posible evaluar la variación del almacenamiento (ΔS) del agua subterránea en el acuífero, que es la solución del balance, pero sin necesidad de evaluar las entradas o salidas de este. Sin embargo, para determinar ΔS es necesario conocer o estimar el coeficiente de almacenamiento promedio del acuífero y la superficie del área de análisis tal como se muestra en la relación Eq.6:

$$\Delta S = S_Y \cdot A \cdot \frac{1}{n} \cdot \sum_{n=1}^n \frac{dh}{dt} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde n es el número de píxeles del mapa de velocidad del nivel freático en el área de análisis, S_Y es el coeficiente de almacenamiento del acuífero (Specific Yield) y A es la superficie del área de análisis.

III.8.1 Comparación de la Disponibilidad de agua subterránea y el índice de El niño y La Niña

Un índice climático es un valor que puede ser usado para describir el estado y los cambios en el sistema climático. Cuando la mayoría de los meteorólogos mencionan los índices climáticos se refieren a los patrones de teleconexión asociados con las variaciones de la presión atmosférica entre dos puntos de la tierra. El Patrón Pacífico Norte América (PNA) se presenta en las latitudes medias del hemisferio Norte. Este patrón está compuesto de anomalías en los campos de altura geopotencial (típicamente a los 700 y 500 hPa) observadas en el norte del Pacífico (Índices Climáticos PDF). El PNA está fuertemente influenciado por el fenómeno de El Niño / Oscilación Sur (ENOS por sus siglas en ingles). La fase positiva del patrón de PNA tiende a asociarse con episodios cálidos del Pacífico (El Niño), y la fase negativa tiende a asociarse con episodios de frío del Pacífico (La Niña) (CPC 2019).

Para comparar los efectos de los eventos climáticos de El Niño y La Niña se realizó una correlación entre la variación de almacenamiento de agua subterránea (ΔS) y el patrón PNA. Esta evaluación comprende los datos de la temporada de secas, esto debido a que el ΔS se realizó con datos de dicho periodo. Los datos del PNA son valores medios del periodo de los meses secos, comprendiendo desde el mes de octubre al mes de mayo.

III.9 EXTRAPOLACIÓN DE TENDENCIAS

III.9.1 Herramienta Curve Fit

Curve Fit es una herramienta de regresión ráster a nivel de píxeles para mapear patrones espaciales desarrollada por De Jager y Fox (2013). Esta herramienta se desarrolló como una extensión de ArcGIS, y es posible ejecutar un análisis de regresión lineal / no lineal para múltiples ráster que representen la evolución temporal. En la misma ubicación de un píxel, la evolución temporal está representada por un modelo matemático único para los píxeles (de diferentes datos de ráster) en la misma ubicación. Los resultados del modelo

ajustado crean un nuevo ráster para cada parámetro del modelo matemático (variables a, b, c, d). Los modelos admitidos incluyen:

$$\text{Linear: } Y = aX + b \quad \text{Ec. 7}$$

$$\text{Polynomial: } Y = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + \dots + a_1 X + a_0 \quad \text{Ec. 8}$$

$$\text{Power: } Y = aX^b \quad \text{Ec. 9}$$

$$\text{Exponential: } Y = ae^{-bx} \quad \text{Ec. 10}$$

$$\text{Four Parameter Logistic: } Y = d + \frac{a-d}{1 + \left(\frac{X}{c}\right)^b} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde a, b, c y d son parámetros para ajustar los modelos a los valores observados, y X representa en nuestro caso el tiempo (años) e Y el nivel de agua subterránea simulado.

Los resultados que genera Curve Fit incluyen el ajuste del modelo, valor P y estadísticas de inferencia de modelos múltiples (AIC o BIC); así como estimaciones de valores de parámetros, errores estándar, estadísticas t y errores residuales.

III.9.2 Coeficiente de Determinación

El coeficiente de determinación (R^2) refleja la bondad del ajuste del modelo con la variable que se pretende determinar, en este caso la evolución futura del nivel freático. Este coeficiente oscila entre 0 y 1, cuando su valor es más cercano a 1 mayor será el ajuste a la variable, esto quiere decir que ahí mayor confianza en el resultado en la predicción futura del nivel freático. De forma inversa, cuando este más cercano a 0 menor será la relación por tanto será menos fiable.

III.10 Programación y automatización de herramienta en Python

En la metodología que se presenta para efectuar este proyecto diversas herramientas y cálculos fueron necesarios para obtener los resultados marcados en los objetivos. Para procesar de forma más rápida y automatizada se desarrolló un script en Python para ejecutarse como herramienta desde el programa ArcGIS. La automatización de esta metodología permite reducir el tiempo de procesamiento de forma considerable, hacer más eficiente el manejo de la información, analizar la incertidumbre del balance con base en los mapas de errores de predicción estandarizado, generar un reporte de los cálculos y reducir la posibilidad de errores debidos al factor humano.

Para la elaboración de la herramienta GWAvailability.py se utilizó el lenguaje de programación Python y se integró en ArcGIS como herramienta.

Python es un lenguaje de programación gratuito, multiplataforma y de código abierto. Se presentó a la comunidad de ArcGIS en la versión 9.0. Desde entonces, se aceptó como el lenguaje de secuencia de comandos de elección para el geoprocesamiento (ESRI 2019). Para la programación de la herramienta en Python se siguió la metodología que a continuación se presenta:

1. Se elaboró un código en Python para el funcionamiento, automatización de herramientas y cálculo del balance de agua subterránea, con la posibilidad de considerar el volumen natural comprometido tal como la metodología de CONAGUA lo presenta en la NOM-011CONAGUA-2015. La herramienta desarrollada se llama GWAvailability.py.
2. Se creó una nueva interfaz de herramienta en ArcMap con las variables que requiere la herramienta GWAvailability.py.
3. La interfaz de herramienta en ArcMap y el script GWAvailability.py se ligaron a través de las variables que requiere el script para ejecutarse desde el entorno de ArcMap.
4. La herramienta es utilizable para versiones superiores de ArcMap a 10.1.

CAPITULO IV: RESULTADOS

IV.1 DATOS RECUPERADOS

Tomando en cuenta que se usó el periodo de años con menor número de mediciones faltantes, periodo del 2008 al 2017, los huecos de información que quedaron fueron recuperados utilizando la información del mismo pozo y la de pozos vecinos. La relación de pozos con huecos de información recuperada y el acuífero al que pertenece se muestra a continuación:

- 61 pozos son del acuífero CARL
- 42 del DMSJ,
- 41 del LS,
- 25 del SMA y
- 6 del SMR

Debido al análisis de validación cruzada y errores que más adelante se explica, se consideró como pozo atípico un pozo del acuífero CARL, con identificación (ID) CARL-6. Después de eliminar el pozo atípico la calibración del modelo geoestadístico mejoró. Finalmente, la base de datos que se utilizó consta de 174 pozos de observación.

IV.2 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS

Los modelos geoestadísticos parten de la premisa de que la distribución de los datos utilizados tiene una distribución normal, por ello se busca que los datos sigan esta distribución. Realizar una estadística descriptiva de los niveles observados en los pozos de monitoreo es importante para analizar el comportamiento de los datos y cómo es su distribución. Del análisis de estas estadísticas y gráficos exploratorios (histogramas) se definió si es necesario transformar o eliminar tendencias en los datos. Todo lo anterior con el objetivo de que la distribución de los datos se aproxime más a una distribución normal.

La estadística descriptiva se generó en ArcGIS mediante la herramienta *Geostatistical Analyst*. Los resultados estadísticos descriptivos de la Tabla 7 muestran que la curtosis (*kurtosis*) y la asimetría (*skewness*) definen la distribución de los datos como leptocúrtica (curtosis < 3) y con un sesgo positivo moderado ($0.5 < \text{asimetría} < 1$), por lo que se infiere que los niveles de agua registrados en la red de monitoreo no sigue una distribución normal. Para confirmar la normalidad de la distribución de los datos, se realizó la prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov (*K-S*) para establecer si se acepta la hipótesis nula de similitud con una distribución normal ($p > 0.05$) o no. Sin embargo, para todos los años la distribución muestra una distribución que no es gaussiana ($p < 0.05$). Además, año con año la distribución de los datos y el valor medio varían, lo que sugiere no estacionariedad en los datos.

Tabla 7. Estadísticas descriptivas del conjunto de datos de muestra en el área de estudio (niveles freáticos respecto a la m.a.s.l. en metros). Donde SD es Desviación Estándar, CV es Coeficiente de Variación y K-S (p) es la prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov.

| Año | No. D | Medía | Mediana | Min | Max | SD | Curtosis | Asimetría | CV | K-S (P) |
|------|-------|--------|---------|--------|--------|-------|----------|-----------|------|---------|
| 2008 | 174 | 1919.2 | 1902.9 | 1815.9 | 2138.1 | 66.20 | 2.70 | 0.67 | 0.03 | < 0.001 |
| 2009 | 174 | 1918.2 | 1901.9 | 1815.1 | 2137.6 | 66.02 | 2.72 | 0.69 | 0.03 | < 0.001 |
| 2010 | 174 | 1917.5 | 1899.9 | 1814 | 2135.9 | 66.44 | 2.68 | 0.70 | 0.03 | < 0.001 |
| 2011 | 174 | 1916.7 | 1899.3 | 1813.7 | 2134.6 | 66.23 | 2.72 | 0.72 | 0.03 | < 0.001 |
| 2012 | 174 | 1915 | 1897 | 1810 | 2130.1 | 66.59 | 2.68 | 0.71 | 0.03 | < 0.001 |
| 2013 | 174 | 1974 | 1895.1 | 1809.7 | 2127.9 | 66.34 | 2.65 | 0.69 | 0.03 | < 0.001 |
| 2014 | 174 | 1913.2 | 1893.6 | 1810.8 | 2124.3 | 66.37 | 2.67 | 0.69 | 0.03 | < 0.001 |
| 2015 | 174 | 1912.8 | 1893.1 | 1809.1 | 2124.9 | 65.59 | 2.67 | 0.69 | 0.03 | < 0.001 |
| 2016 | 174 | 1912 | 1893.5 | 1806.3 | 2125 | 66.30 | 2.78 | 0.70 | 0.03 | < 0.001 |
| 2017 | 174 | 1910.2 | 1890.7 | 1803.8 | 2119.6 | 66.53 | 2.77 | 0.69 | 0.03 | < 0.001 |

La Figura 21 muestra los histogramas de los datos del nivel freático (msnm) para cada año evaluado, estos gráficos sirven para verificar si la distribución de la frecuencia de los datos sigue la forma de una distribución normal, la cual tiene la forma de una Campana de Gauss. Los histogramas muestran que hay una mayor frecuencia en las clases del lado izquierdo que en el lado derecho por lo cual el sesgo en la distribución tiende hacia a la izquierda en todos los años. En ningún año se presenta un gráfico que se comporte a una distribución normal o tenga forma de Campana de Gauss.

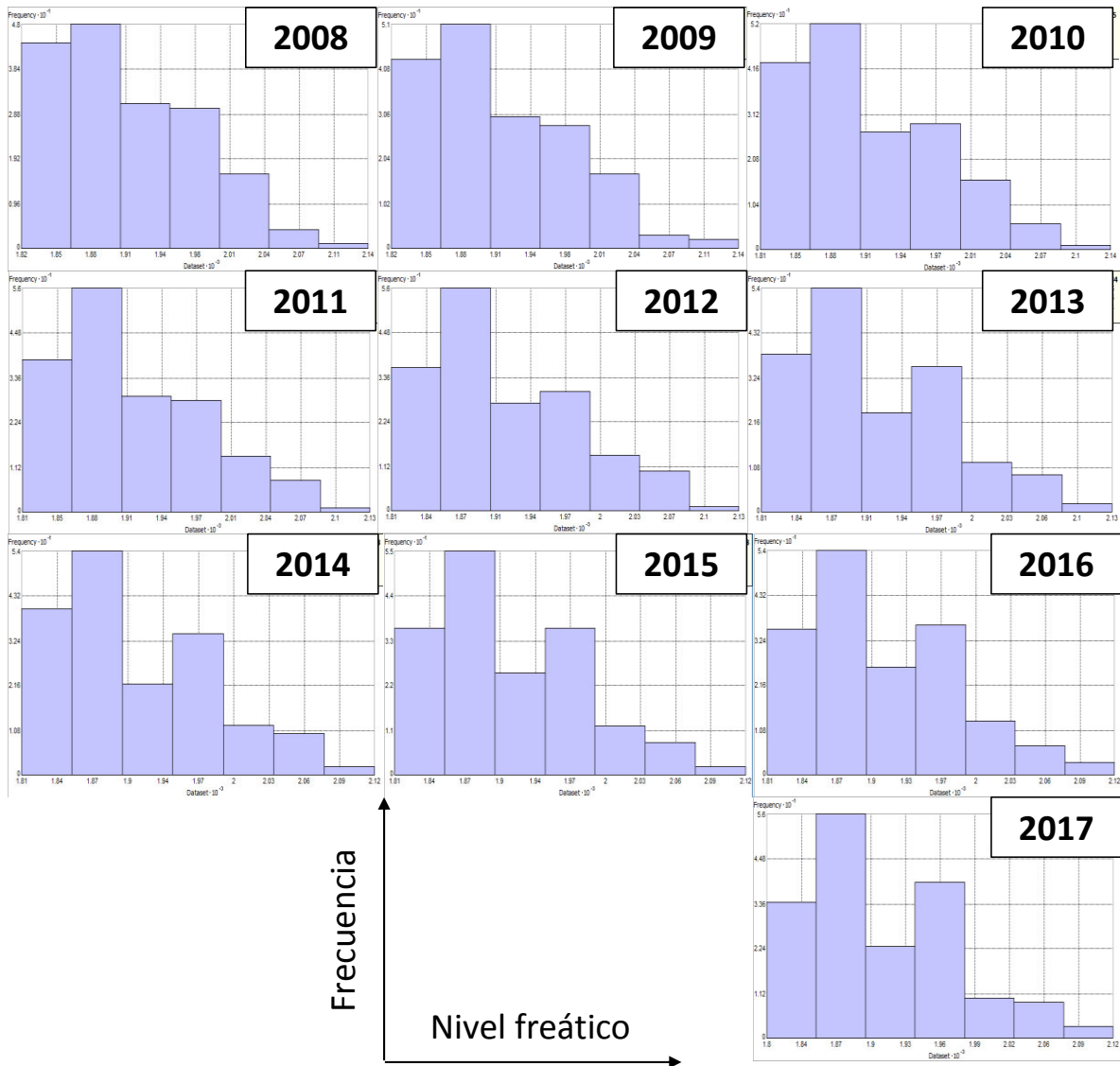


Figura 21. Histogramas de las frecuencias de las clases del nivel freático con dimensión en metros sobre el nivel del mar (msnm) para cada año evaluado.

IV.3 CALIBRACIÓN DEL MODELO GEOESTADÍSTICO EBK

La calibración del modelo geoestadístico consiste en probar distintas configuraciones y seleccionar la que genere una menor variabilidad de las predicciones, ello verificando posibles datos atípicos, distintos escenarios de calibración, y mediante el análisis de los errores de predicción generados por la validación cruzada mediante las reglas mostradas en la Tabla 6.

IV.3.1 Identificación de posibles datos atípicos (outliers)

Un valor atípico (outlier) es un valor en un conjunto de datos que es muy diferente de los otros valores. Esto es, los outliers son valores excepcionalmente lejanos del valor medio o promedio. En la mayoría de los casos, los outliers tienen influencia en la media, pero no en

la mediana, o la moda. Por lo tanto, los outliers son importantes en su efecto en la media. No hay una regla para identificar a los outliers. Pero algunos libros refieren un valor como un outlier si este es mayor que 1.5 veces el valor del rango intercuartil más allá de los cuartiles.

La herramienta de análisis Geoestadístico de ArcMap representa en un mapa de Voronoi los posibles outliers de la siguiente manera: Todas las celdas se colocan en cinco intervalos de clase. Si el intervalo de clase de una celda es diferente de cada uno de sus vecinos, la celda es de color gris para distinguirlo de sus vecinos.

El análisis de outliers se realizó con la herramienta de Arcmap y la base de datos de 175 pozos con registros del nivel piezométrico medidos en los años del 2008 al 2017, usando mapas Voronoi de "Tipo Cluster" como se observa en la Figura 22:

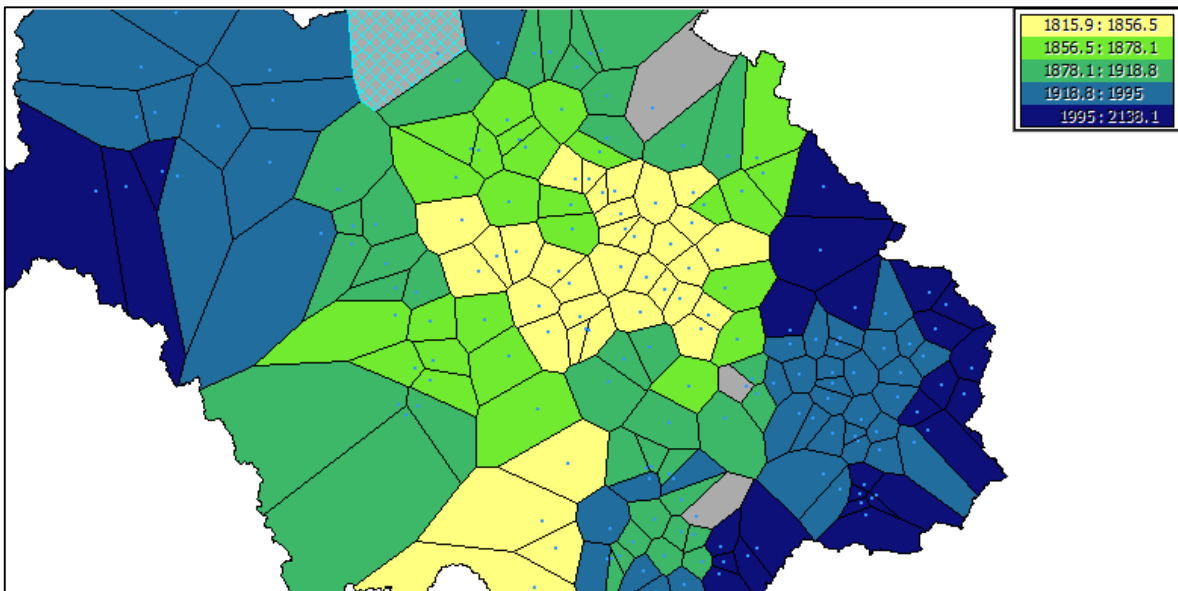


Figura 22. Mapa del Voronoid (herramienta Cluster) para el año 2008, en las celdas en gris pertenece a outliers y el que se encuentra enmarrado en azul representa al dato del CARL-6.

El pozo CARL-6 resultó clasificado como outlier para todos los años. Una vez identificado los posibles outlier (CARL-6 y otros mostrados en color gris en la Figura 22), se procedió a verificar en del modelo EBK si los errores de predicción y de la validación cruzada se reducen al eliminar estos posibles outliers.

Examinando la comparación el valor de predicción con el valor medido de CARL-6 utilizando la configuración de calibración **LE-KB-390** (véase configuración en la Tabla 10), se verificó que CARL-6 es un outlier y genera un importante error de predicción si es considerado en el análisis. La Tabla 8 muestra los valores extremos de errores en la predicción, se observa que al eliminar el dato CARL-6 se reduce el error en ambos extremos.

Tabla 8. Pozos con mayor error positivo y negativo en la predicción del modelo LE-KB-390, considerando 175 datos con CARL-6 y 174 datos sin CARL-6.

| No. Datos | Pozo (ID) | Medido | Predicho | Error |
|---------------------------------|-----------|---------|----------|---------|
| 175 (considerando CARL 6) | CARL-6 | 2058.61 | 1930.12 | -128.48 |
| | CARL-19 | 1894.13 | 1984.7 | 90.56 |

| No. Datos | Pozo (ID) | Medido | Predicho | Error |
|-------------------------------|-----------|---------|----------|--------|
| 174 (eliminando CARL 6) | CARL-64 | 2031.69 | 1949.58 | -82.11 |
| | SMA-166 | 1910.59 | 1982.19 | 71.6 |

La Tabla 9 muestra la comparación de los pozos con el máximo error positivo y negativo que genera modelo EBK si se considera el pozo CARL-6 (175 pozos) y sin CARL-6 (174 pozos). Analizando las reglas de validación cruzada se observa una mejora en los errores de predicción del modelo al eliminar CARL-6, pero no así para los otros posibles outliers detectados en la Figura 22.

Tabla 9. Comparación en errores en la predicción con y sin el pozo CARL-6.

| Modelo | | LE-KB-390 | |
|-------------------|------------------------------|-------------|------------|
| No. Datos | | 175 | 174 |
| Prediction Errors | Samples | 175 to 175 | 174 to 174 |
| | Mean | -0.80236 | -0.330532 |
| | Root-Mean-Squre | 23.35676 | 21.03782 |
| | Mean Standadized | -0.01166731 | 0.01063445 |
| | Root-Mean-Squre Standardized | 1.009093 | 0.9908107 |
| | Average Standard Error | 21.65388 | 20.57461 |

Por las razones antes mencionadas y evaluando la configuración del nivel freático comparado con el modelo conceptual, se decidió retirar el pozo CARL-6 para el presente análisis, por lo cual de 175 pozos solo se utilizó 174 pozos de monitoreo de los años del 2008 al 2017 para formar los modelos de predicción del nivel freático del presente proyecto.

IV.3.2 Calibración del modelo EBK

En la presente investigación se consideraron dos escenarios de calibración de parámetros para comparar cuál generaba mejores resultados: el primer escenario de calibración utiliza un único modelo EBK para predecir todos los niveles observados en los pozos de la red de monitoreo que están dentro de los límites de la CI, lo que incluye a todos los pozos de los acuíferos que conforman la CI (174 pozos); el segundo escenario de calibración es utilizando cuatro modelos EBK, un modelo geoestadístico EBK para cada acuífero de forma

independiente (utilizando únicamente los pozos de monitoreo que corresponden a cada acuífero), véase la Tabla 11.

Con los dos escenarios de calibración propuestos se pretende esclarecer algunas cuestiones como son:

1. ¿Existe correlación espacial entre los niveles de agua observados en los pozos de los cuatro acuíferos?
2. ¿Es mejor la predicción de niveles observados utilizando un modelo para cada acuífero que utilizando un modelo para todos los acuíferos?
3. ¿Son menores los errores de predicción estandarizado utilizando un modelo por acuífero que un modelo para todos los acuíferos?

IV.3.2.1 Escenario 1: calibración de toda la cuenca como un único acuífero

En la configuración de parámetros del modelo EBK se implementó una transformación logarítmica (*Log Empirical*) y se utilizó una curva teórica con eliminación de tendencias (*Semivariogram Type Detrended*) en los datos. Después de probar múltiples configuraciones de parámetros se seleccionaron las 3 mejores para mostrar en la Tabla 10:

Tabla 10. Configuración de parámetros del modelo de Kriging bayesiano empírico del nivel de agua subterránea del año 2008.

| ID | | LE-KB-390 | LE-KB-590 | LE-KB-101 |
|---------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| General Properties | Subset Size | 67 | 67 | 48 |
| | Overlap Factor | 2 | 2 | 2 |
| | Number of Simulations | 390 | 590 | 101 |
| | Output Surface Type | Prediction | Prediction | Prediction |
| | Transformation | Log Empirical | Log Empirical | Log Empirical |
| | Semivariogram Type | K-Bessel Detrended | K-Bessel Detrended | K-Bessel Detrended |
| Search Neighborhood | Neighborhood type | Smooth Circular | Smooth Circular | Smooth Circular |
| | Smoothing factor | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| | Radius | 10945 | 10945 | 9600 |
| Prediction Errors | Samples | 174 to 174 | 174 to 174 | 174 to 174 |
| | Mean | -0.330532 | -0.407522 | -0.6711 |
| | Root-Mean-Square | 21.03782 | 21.07054 | 21.973 |
| | Mean Standardized | 0.01063445 | 0.005878467 | 0.00317666 |
| | Root-Mean-Square Standardized | 0.9908107 | 0.9834674 | 0.9744959 |
| | Average Standard Error | 20.57461 | 20.72238 | 21.02234 |

De la calibración las mejores predicciones se lograron utilizando una transformación *Log Empirical* y la curva teórica *K-Bessel Detrended*.

Analizando los errores de predicción de las tres configuraciones mostradas en la Tabla 10, se observa que los errores son muy similares y, además, las predicciones del nivel freático que generan son coherentes con la dirección de los flujos del modelo conceptual esperado para la Cuenca Independencia inferida de otros estudios (Ortega M, 2009). Por ello, la configuración que se seleccionó fue la que mejor se ajusta a los criterios de valoración de la variabilidad de la predicción mostrado en la Tabla 6. La configuración seleccionada fue la **LE-KB-390** que tiene un *subset size* de 67 datos y 390 iteraciones.

IV.3.2.2 Escenario 2: calibración independiente para cada acuífero

La Tabla 11 presenta las mejores configuraciones de parámetros del modelo EBK para cada acuífero por separado, se muestran las mejores configuraciones de modelo que se obtuvieron para cada acuífero.

Tabla 11. Configuración de parámetros del modelo de Kriging bayesiano empírico del nivel de agua subterránea del año 2008 para cada zona administrativa.

| <i>Acuífero</i> | | LS | DMSJ | SMA | CARL |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| General Properties | Subset Size | 41 | 42 | 25 | 48 |
| | Overlap Factor | 2 | 1 | 1 | 2 |
| | Number of Simulations | 100 | 100 | 105 | 100 |
| | Transformation | Log Empirical | Empirical | None | Empirical |
| | Semivariogram Type | K-Bessel | K-Bessel Detrended | Thin Plate Spline | K-Bessel Detrended |
| Search Neighborhood | Neighborhood type | Smooth Circular | Smooth Circular | Smooth Circular | Smooth Circular |
| | Smoothing factor | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| | Radius | 13567 | 9500 | 7500 | 21000 |
| Prediction Errors | Samples | 41 to 41 | 42 to 42 | 25 to 25 | 60 to 60 |
| | Mean | -2.3943 | -2.1037 | 1.4648 | -0.6472 |
| | Root-Mean-Square | 27.9488 | 18.3169 | 28.2883 | 16.0629 |
| | Mean Standardized | -0.029 | -0.0594 | 0.0823 | -0.025 |
| | Root-Mean-Square Standardized | 1.0684 | 1.0561 | 0.9525 | 0.9843 |
| | Average Standard Error | 20.7395 | 16.4996 | 31.0057 | 15.827 |

El análisis de errores de predicción para cada acuífero mostrados en la Tabla 11 muestra que no se cuenta con una buena validación cruzada, al validar con los criterios vistos en Tabla 6, lo que sí se presenta en la configuración de parámetros del modelo EBK tomados como un único acuífero.

IV.3.2.3 Comparación de escenarios de calibración.

La comparación de la predicción de los dos escenarios de calibración del modelo EBK se muestra en la Figura 23. El análisis de los mapas de predicción del nivel freático muestra que la calibración con el escenario 1 (calibración de toda la cuenca como un único acuífero) predice mejor la dirección de los flujos esperados según el modelo conceptual de la cuenca y mejora los errores de la validación cruzada. Además, se puede denotar lo indispensable del uso de los pozos del acuífero Santa María del Río para la evaluación de dicho nivel en la parte norte del Acuífero CARL.

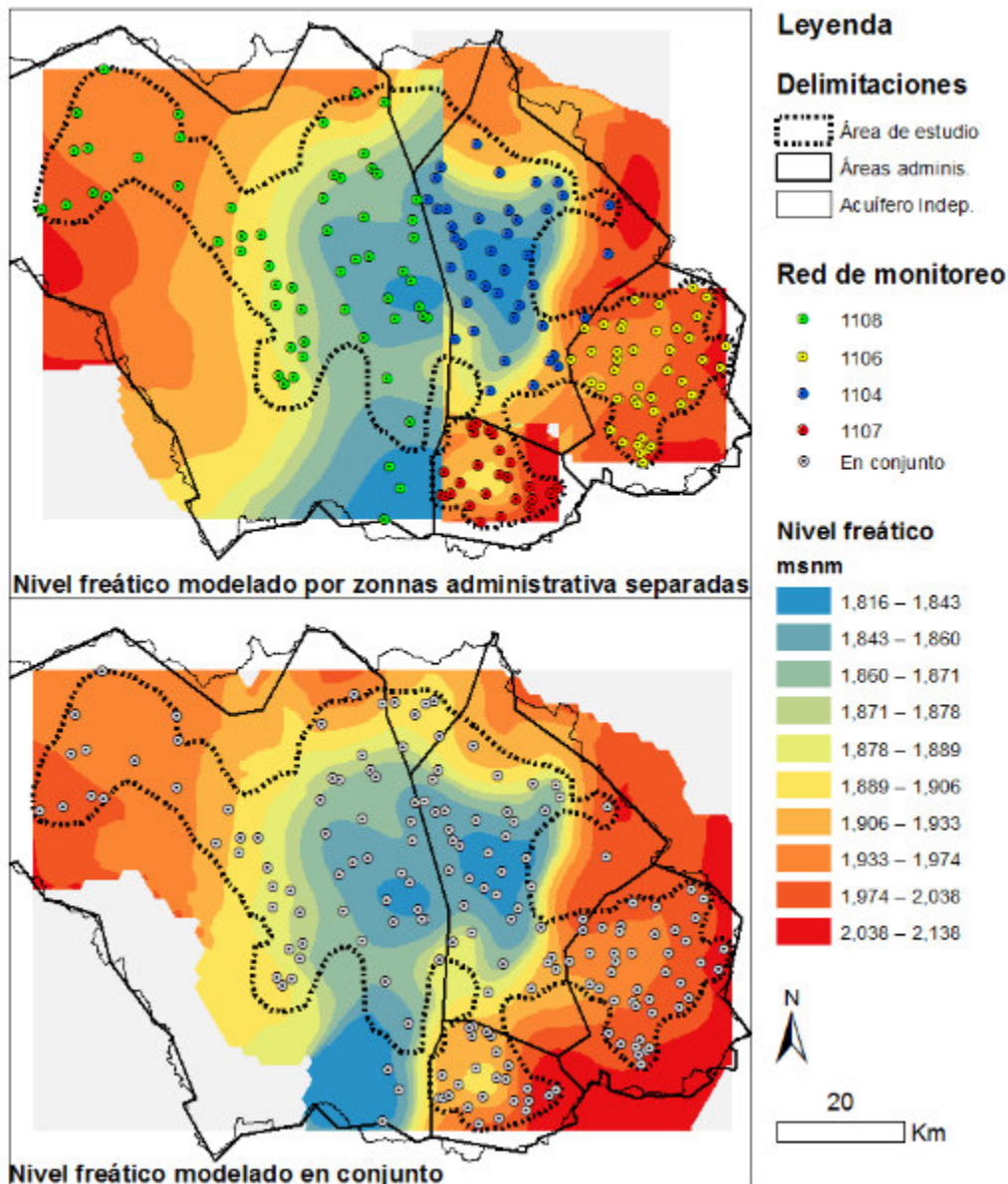


Figura 23. Mapas de comparación de los errores de predicción de los distintos escenarios de calibración del nivel freático para el año 2008, arriba configuración por zonas administrativas y abajo en conjunto.

Esto al parecer se debe a que, la variabilidad espacial del nivel freático en los cuatro acuíferos se explica mejor considerando que son un único acuífero, lo cual mejora la capacidad de predicción del modelo EBK.

IV.3.3 Comparativa de valores predichos y valores observados

Las predicciones del modelo geostadístico mostraron un buen ajuste para cada año según se observa en los gráficos comparativos entre los valores predichos y los valores observados (Figura 23), donde la pendiente de la línea de ajuste es cercana a uno y los coeficientes de correlación para cada año es cercano a 1 con una variabilidad muy baja, lo cual sugiere una calibración satisfactoria del modelo para los años del periodo 2008-2017. La comparativa muestra que la mayoría de los datos se encuentran dentro de los límites de predicción del 95% de nivel de confianza, los datos que se observan fuera de este límite pertenecen a pozos que se encuentran, o están cerca de, áreas del medio fracturado.

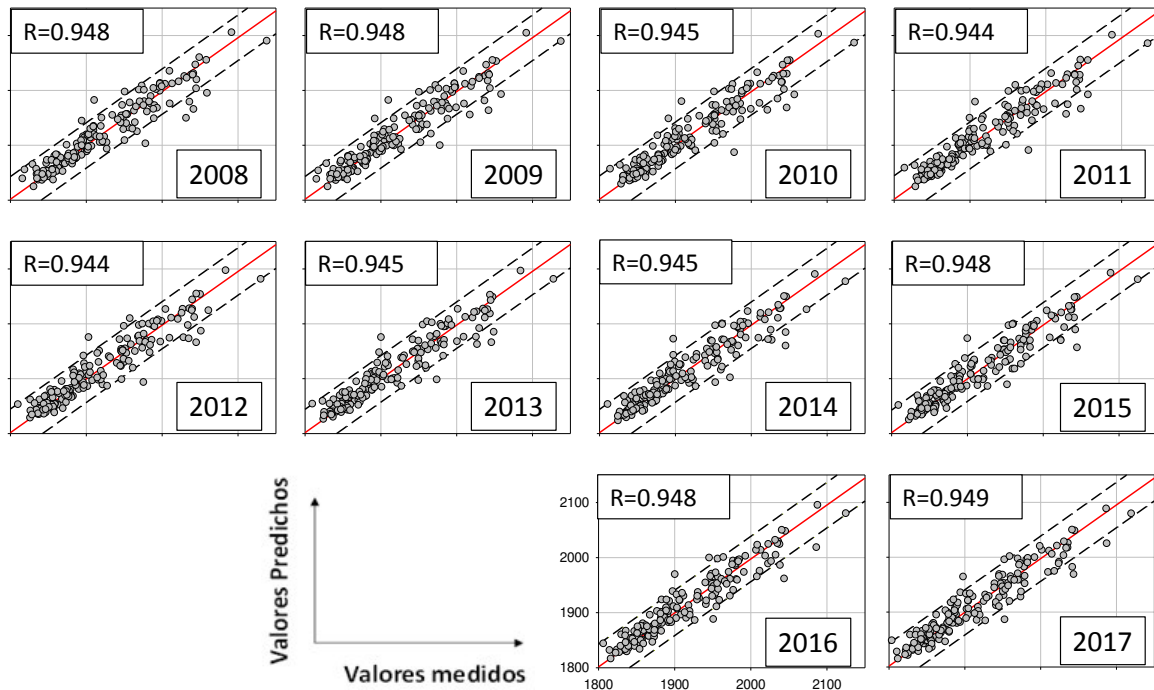


Figura 24. Valores medidos versus los valores predichos por el modelo EBK para los años 2008-2017. La regresión del diagrama de dispersión lineal está representada por una línea continua roja, los límites de predicción del 95% de nivel de confianza mediante líneas grises discontinuas y el Coeficiente de Correlación se muestra como R.

IV.3.4 Análisis de los errores de predicción de la validación cruzada

La configuración de parámetros LE-KB-390 se implementó para generar la predicción de los niveles freáticos. Los errores generados en el proceso de validación cruzada de ArcMap son analizados en este apartado.

Parte del proceso de validación cruzada es analizar si los errores mostrados en la en la Tabla 12 cumplen con las reglas de validación de la Tabla 6. Estas reglas de validación sirven para verificar que no se incurra en una subestimación o sobreestimación.

Tabla 12. Configuración de los errores de predicción para comparar con las reglas de validación cruzada para los años 2008-2017.

| AÑO | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ME | -0.331 | -0.327 | -0.425 | -0.381 | -0.446 |
| RMSE | 21.038 | 21.069 | 21.675 | 21.786 | 21.926 |
| MSE | 0.011 | 0.010 | 0.008 | 0.018 | 0.008 |
| RMSSE | 0.991 | 0.987 | 1.007 | 1.005 | 1.009 |
| ASE | 20.595 | 20.966 | 21.233 | 21.263 | 21.514 |

| AÑO | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ME | -0.378 | -0.420 | -0.317 | -0.430 | -0.436 |
| RMSE | 21.599 | 21.628 | 20.931 | 21.010 | 21.041 |
| MSE | 0.014 | 0.013 | 0.013 | 0.012 | 0.009 |
| RMSSE | 0.987 | 0.992 | 0.966 | 0.985 | 0.978 |
| ASE | 21.588 | 21.507 | 21.608 | 21.332 | 21.613 |

Los errores generados por el proceso de validación cruzada de la Tabla 12 sugieren que el modelo no tiene sesgos importantes de predicción ya que el RMSSE ≈ 1 , ASE \approx RMSE, ME ≈ 0 y MSE ≈ 0 . Por lo que el modelo geoestadístico EBK puede ser utilizado para generar predicciones del nivel freático en los pozos de la red de monitoreo.

IV.3.5 Test de normalidad de los errores de predicción

La prueba de normalidad aplicada en este apartado es la de Kolmogorov – Smirnov (K-S) con un alfa=0.05 para evaluar si la distribución de los errores sigue o no una distribución normal. Para esta prueba se evalúa la hipótesis que implica que hay similitud entre la distribución de los errores con una distribución normal. Entonces, si el valor $P > 0.05$ implica que esta hipótesis se acepta y si $P < 0.05$ se rechaza.

Tabla 13. Test de normalidad de los errores de predicción para cada año evaluado.

| AÑO | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|---------|-------|-------|-------|-------|--------|
| K S (P) | 0.004 | 0.060 | 0.014 | 0.028 | 0.030 |
| AÑO | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
| K S (P) | 0.110 | 0.087 | 0.191 | 0.174 | >0.200 |

La Tabla 13 presenta los valores P de cada año evaluado, se observa que los valores que aceptan la hipótesis y por lo tanto siguen una distribución normal son 2009, 2013, 2014, 2015, 2016 y 2017. Mientras tanto los valores que no aceptan la hipótesis o no se comportan como distribución normal son 2008, 2010, 2011 y 2012, esto posiblemente por datos de

pozos que se encuentran en zonas de montaña principalmente en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja, estos pozos han presentado grandes cambios en su nivel freático.

IV.3.5.1 Análisis de los errores de predicción

Una forma de verificar el desempeño del modelo geoestadístico es a través de los gráficos Cuantil - Cuantil (*Q-Q Plot*) de normalidad, que permite comparar la distribución de los errores de predicción estandarizados respecto de una distribución normal, donde se puede observar en la Figura 25.

En la mayoría de los años la distribución de los errores no muestra desviaciones importantes de la linealidad, por lo que no se puede descartar la hipótesis nula de similitud con una distribución normal. Por lo tanto, la distribución de los errores tiene similitud con una distribución normal, lo cual implica que el modelo EBK no presenta sesgos importantes de predicción que impidan su implementación. Cabe señalar que los datos extremos son los que más se alejan de la linealidad, y ello es debido a que son datos localizados en los límites de la red de monitoreo más próximos a zonas de montaña o macizos rocosos, donde las propiedades hidráulicas pueden diferir más de las del acuífero granular y donde además existen menos pozos de monitoreo, todo lo cual proporciona un mayor error en la estimación.

Los resultados del test de normalidad K-S muestra que los años 2009 y del 2013 a 2017 siguen una distribución normal ya que $P > 0.05$, mientras que para los años 2008 y del 2009 a 2012 la hipótesis de normalidad está próxima pero estadísticamente se rechaza.

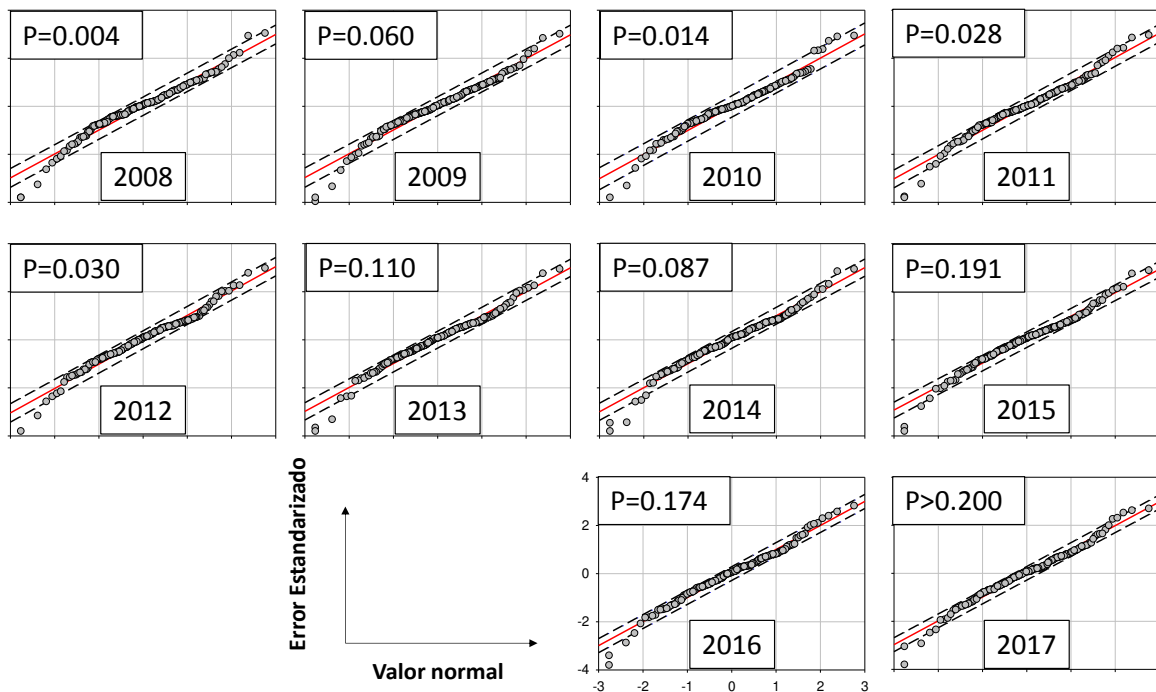


Figura 25. Gráficos Q-Q normales de errores estandarizados para los años 2008-2017. La regresión del diagrama de dispersión lineal está representada por una línea continua roja, los límites de predicción al 95% de nivel de confianza mediante líneas grises discontinuas.

IV.4 ÁREA DE ANÁLISIS

IV.4.1 Delimitación del área de análisis

La delimitación del área de análisis consistió en definir el área donde los errores de predicción estandarizados sean menores y mantener, en la medida de lo posible, el área de análisis en la geología de porosidad primaria.

Para este proceso de delimitación del área de análisis se utilizó el mapa de errores del modelo del 2008, generando isolíneas de error para definir el área de análisis y dejar fuera aquellas zonas donde la incertidumbre se eleva de forma rápida, y el mapa de geología, para mantener en la medida de lo posible el área de análisis en materiales de porosidad primaria. Además, se consideró que las fallas geológicas funcionan como límites naturales. Delimitar el área de menor incertidumbre es importante para dar certeza a las predicciones del nivel freático que se realicen en esta zona de análisis con el modelo EBK.

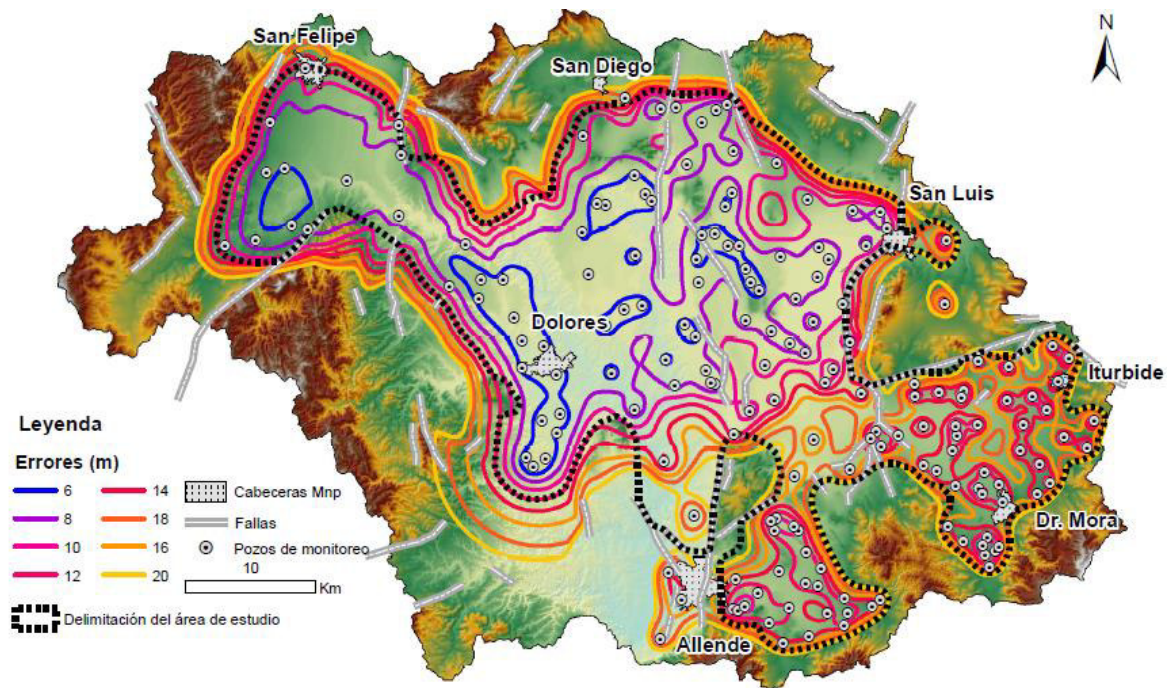


Figura 26. Mapa isolíneas de errores de predicción estandarizado para el año 2008 y la delimitación del área de estudio.

En la Figura 26 se muestra en una línea negra punteada que delimita del área de estudio. El área de estudio se delimitó utilizando la isolínea de error de 14 metros, esto debido a que los errores aumentan rápidamente al alejarse de la red de monitoreo y en esta isolínea los errores tienen poco cambio y se mantiene la geología con porosidad primaria. Finalmente, las fallas geológicas se utilizaron como límites naturales del área de estudio. En ciertas zonas se mantuvo el trazado siguiendo las fallas geológicas, manteniendo el área de estudio, en la medida de lo posible, en la geología con una porosidad primaria y descartando las zonas de montañas que representan una porosidad secundaria.

IV.4.2 Mapas de errores de predicción estandarizado

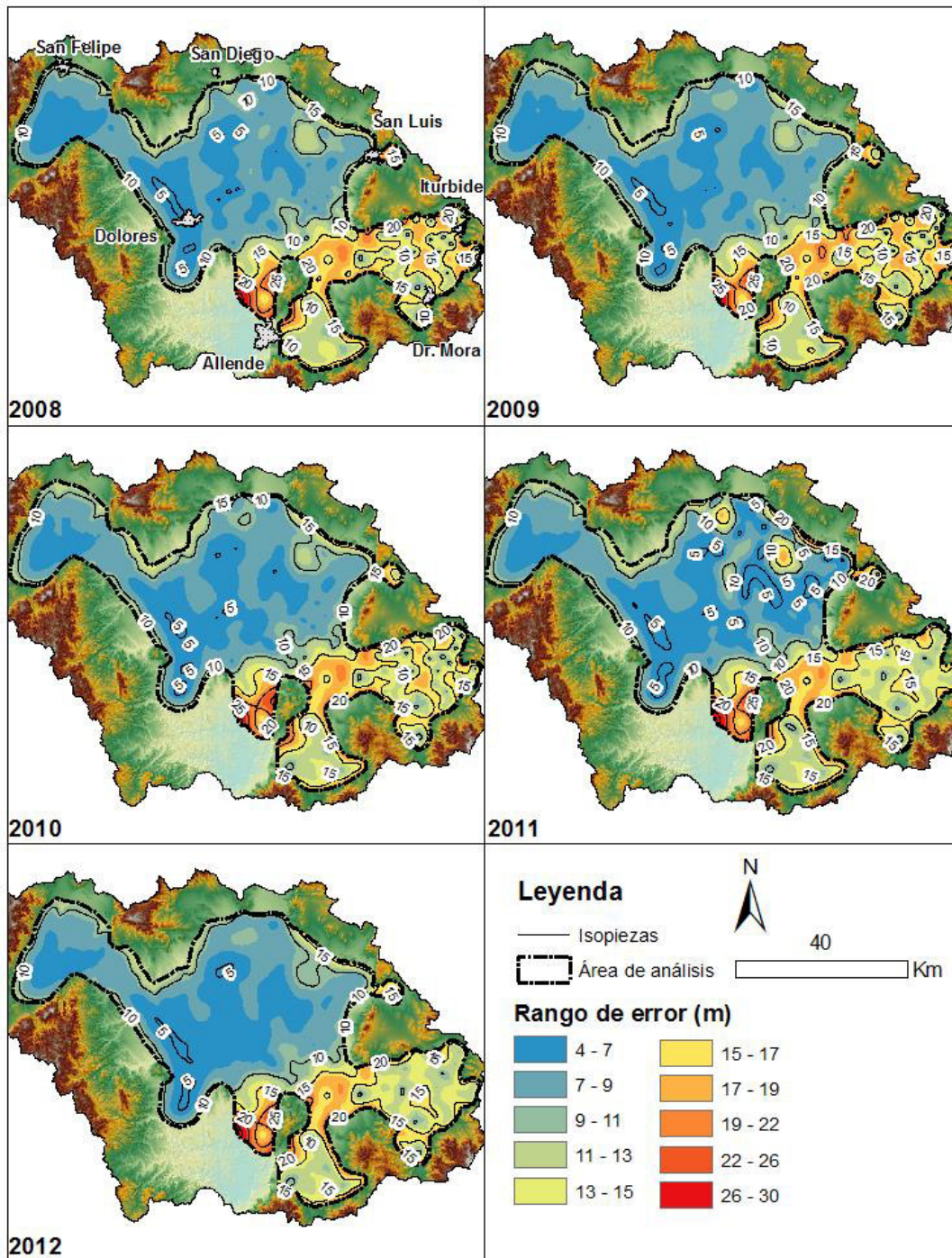


Figura 27. Mapas de errores de predicción estandarizados para los años 2008-2012.

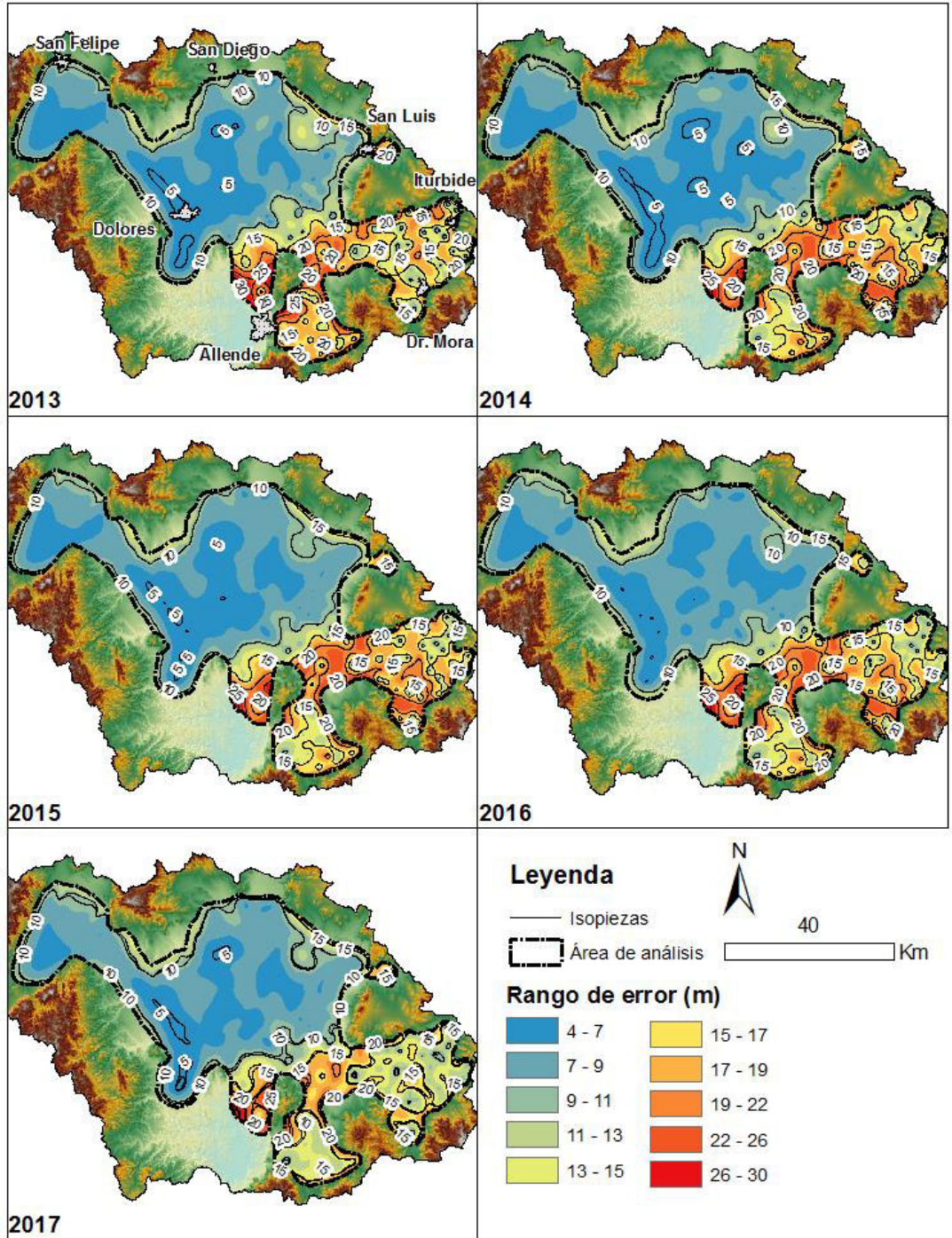


Figura 28. Mapas de errores de predicción estandarizado para los años 2013-2017.

Los mapas de error estandarizado en la predicción del modelo, Figura 27 y Figura 28, se analizaron mediante el uso de mapas de error año con año. Estos mapas cuantifican el error de predicción estandarizado en la predicción del nivel freático en metros.

De los mapas de error de predicción estandarizado se observó un comportamiento diferenciado del rango de error en la predicción del nivel freático y que permite definir dos zonas: la primera zona de menor rango error en la predicción se encuentran dentro del área de los acuíferos CARL y LS; la segunda zona de mayor rango de error está dentro de las áreas de los acuíferos SMA y DMSJ.

El comportamiento observado de los errores de predicción estandarizado delimita dos zonas con distinto rango de error que puede deberse a distintos factores como son:

- Hidráulicamente los acuíferos dependen unos de otros, aunque esta dependencia está en cierta medida limitada por la presencia de fallas o cambios en las propiedades hidrodinámicas de la geología.
- Las diferencias de recarga (lateral y vertical) es un factor relevante que definen el comportamiento de los acuíferos.
- La distribución de los pozos, sus distintos usos y volumen de extracción de agua subterránea.

En los acuíferos CARL y LS predomina el rango de error principalmente de 5 m a 10 m, mientras tanto los acuíferos DM-JI y SMA cuenta con mayor rango de incertidumbre en la predicción del NF que va de los 10 m a 20 m.

La Tabla 14 muestra el resumen del análisis de errores en la predicción del freático. Los errores promedios van desde 10.29 a 11.44 metros considerando el tamaño completo del área de análisis de la CI.

Tabla 14. Grado de incertidumbre dentro del área de análisis para cada uno de los periodos analizados

| AÑO | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Error Mínimo | 4.20 | 4.44 | 4.22 | 3.14 | 4.61 |
| Error Máximo | 32.64 | 32.60 | 33.10 | 32.95 | 32.67 |
| Error Medio | 10.56 | 10.63 | 10.55 | 10.39 | 10.29 |
| Desviación Estándar | 4.23 | 4.31 | 4.25 | 4.38 | 4.19 |

| AÑO | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Error Mínimo | 4.38 | 4.04 | 4.80 | 4.79 | 4.81 |
| Error Máximo | 36.00 | 33.27 | 33.15 | 33.43 | 33.24 |
| Error Medio | 11.44 | 10.95 | 11.13 | 11.20 | 10.74 |
| Desviación Estándar | 5.39 | 5.28 | 5.16 | 4.97 | 4.30 |

IV.4.3 Comparativa de la predicción del modelo geoestadístico con el modelo conceptual

Para determinar la funcionalidad del modelo, se hace la comparativa de la del primer año evaluado 2008 con el modelo conceptual. Se utiliza la predicción del año 2008 debido a que este periodo fue el que se usó para calibrar el modelo EBK para usarse en los demás

periodos. La comparación se realizó utilizando equipotenciales de valor de cota cada 20 m y además generando líneas de flujo para observar su dirección.

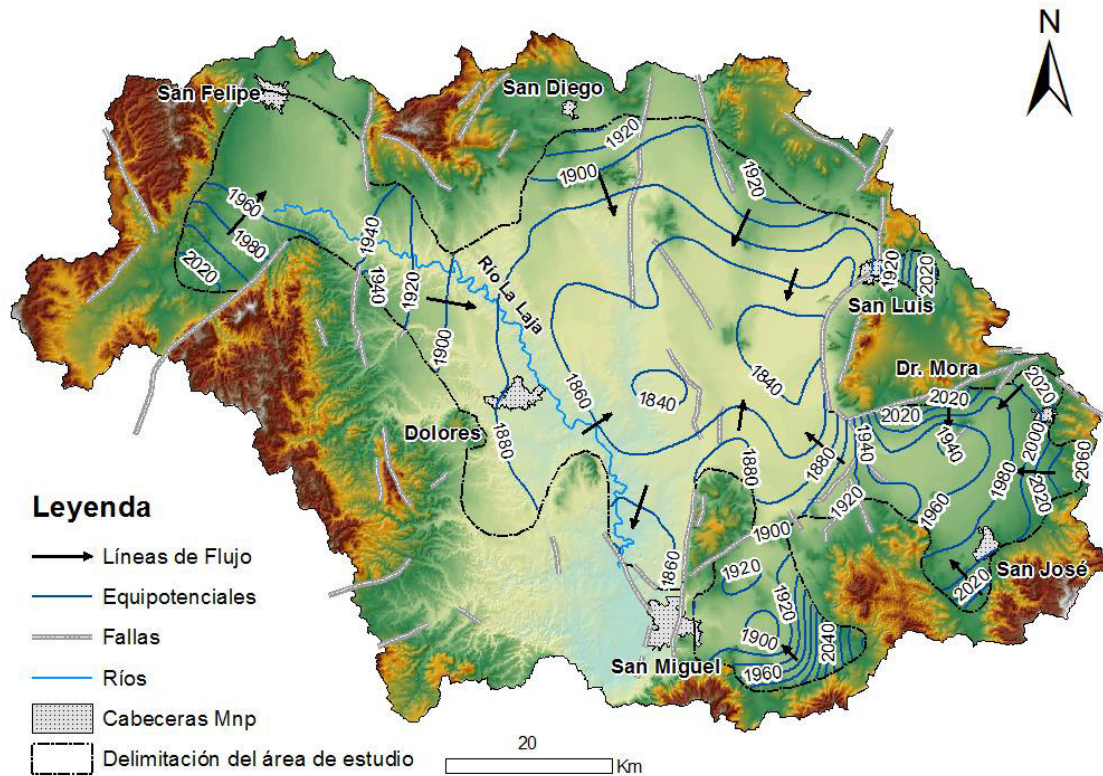


Figura 29. Modelo del nivel freático y direcciones de flujo del año 2018.

La predicción del nivel freático del 2008, visto en la Figura 29, presento una configuración radial en la Cuenca Independencia (CI) donde se observan las cotas de mayor nivel en la periferia de la CI y las menores cotas en el centro de la CI y al sur de la cabera de San Miguel de Allende. Esta configuración es correspondiente la forma del acuífero y con lo que actualmente se conoce respecto de la ubicación del cono de abatimiento.

Entonces, las direcciones de flujo definen que las zonas de recarga principalmente son las zonas de montaña.

Se observa que la zona de la CI es una cerrada, donde su única descarga natural es por la parte sur, donde se localiza la presa Allende, pero debido a la sobreexplotación se formó un gran cono de abatimiento cambiando las direcciones de flujo.

Los acuíferos CARL, LS y DMSJ muestran una fuerte relación en su nivel freático donde sus direcciones de flujo se dirigen al centro de la cuenca, esto indica una fuerte conectividad de los flujos de agua subterránea entren los tres acuíferos. Mientras tanto el acuífero SMA

posiblemente puede estar desconectado de los demás acuíferos debido a que las direcciones de flujo tienen una configuración cerrada en la cuenca que forma este acuífero.

Existen cuatro zonas de abatimiento, una se encuentra en el centro del acuífero SMA, otra en la parte central norte del acuífero DMSJ y las últimas dos están asociadas a dos grandes conos de abatimiento en el centro de la CI, los cuales están al centro de los acuíferos LS y CARL.

En comparativa con la predicción del nivel freático y direcciones de flujo de la Cuenca Independencia para el año 1998, estudio realizado por Ortega M, 2009, Figura 30, se observan las siguientes diferencias:

- Los conos de abatimiento difieren en su localización, especialmente al norte de la presa el Gallinero y al centro de la CI
- Las direcciones de flujo difieren principalmente en el centro de la CI, donde para el año 2008 se observa que todas las direcciones confluyen desde la periferia hacia el centro.

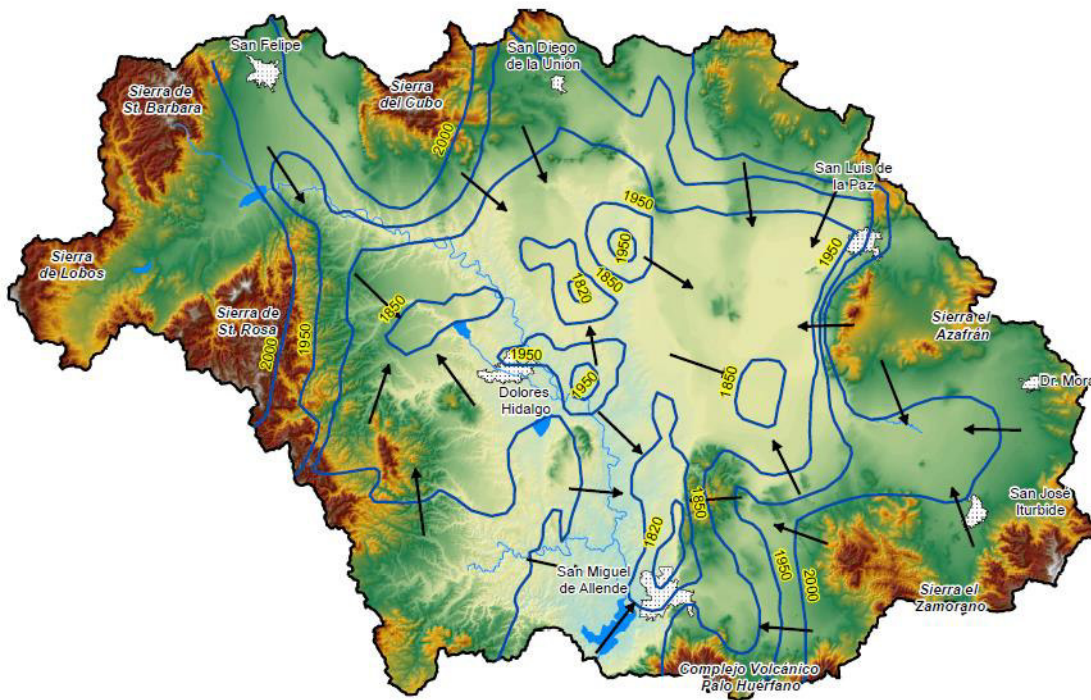


Figura 30. Modelo de Profundidad del nivel estático, distribución de carga hidráulica y líneas preferenciales de flujo de agua subterránea, 1998 (Ortega M, 2009).

La configuración del nivel freático de las Figura 29 y la Figura 30 muestran similitud en la configuración casi radial donde las cotas de mayor nivel freático están en el contorno de la cuenca cercanas a las zonas de montaña y las cotas de menor valor se presentan al centro del acuífero. Esta configuración indica entonces que la predicción de los modelos comparados implican que las zonas de recarga son principalmente las zonas de montaña en el contorno de la cuenca.

Se establece que las configuraciones del nivel freático y direcciones de flujo difieren al centro de la CI, pero son similares en los contornos de la CI. Cabe señalar que las diferencias de predicción del nivel freático de los modelos son debidas a los distintos periodos de tiempo, la cantidad de datos y el modelo de interpolación utilizado en ambos casos.

IV.4.4 Mapas de predicción del nivel freático para cada periodo

Con el modelo EBK calibrado se generaron mapas de predicción del nivel freático del periodo 2008-2017 para la CI, Figura 31 y Figura 32.

En resumen, los mapas muestran que durante el periodo 2008-2017 las mayores elevaciones en el nivel freático se encuentran al noroeste del acuífero CARL y al oeste de los acuíferos DMSJ y SMA, zonas que representan las principales áreas de recarga natural de los acuíferos según CONAGUA (2015a). La zona de menor nivel freático se encuentra al centro de la CI que comprende las partes centrales de los acuíferos CARL y LS, zona donde se genera un cono de abatimiento debido a la sobreexplotación del agua subterránea que ha ocurrido en la zona. En los mapas se representan cotas de mismo valor del NF (isopiezas) a cada 25 m. Las direcciones de flujo (que parten de las zonas de mayor elevación a zonas de menor elevación en el NF) tienen direcciones de la periferia al centro de la CI. Esto sugiere una fuerte conexión hidrogeológica entre los acuíferos CARL, LS y DMSJ que les confiere un gran potencial de relación para ser modelados en conjunto. Mientras tanto el acuífero SMA al parecer es un acuífero desconectado de los demás acuíferos de la zona de estudio, ya que muestra direcciones de flujo desde su periferia al centro de este.

La evolución temporal de las predicciones de los niveles freáticos muestra un incremento del área del cono de abatimiento en la parte central de la CI donde se encuentra los niveles más bajos, indicando que el acuífero ha sido sometido a una fuerte sobreexplotación en esta zona. Además, se observó un aumento de la superficie de los conos de abatimiento locales en los acuíferos SMA y DMSJ.

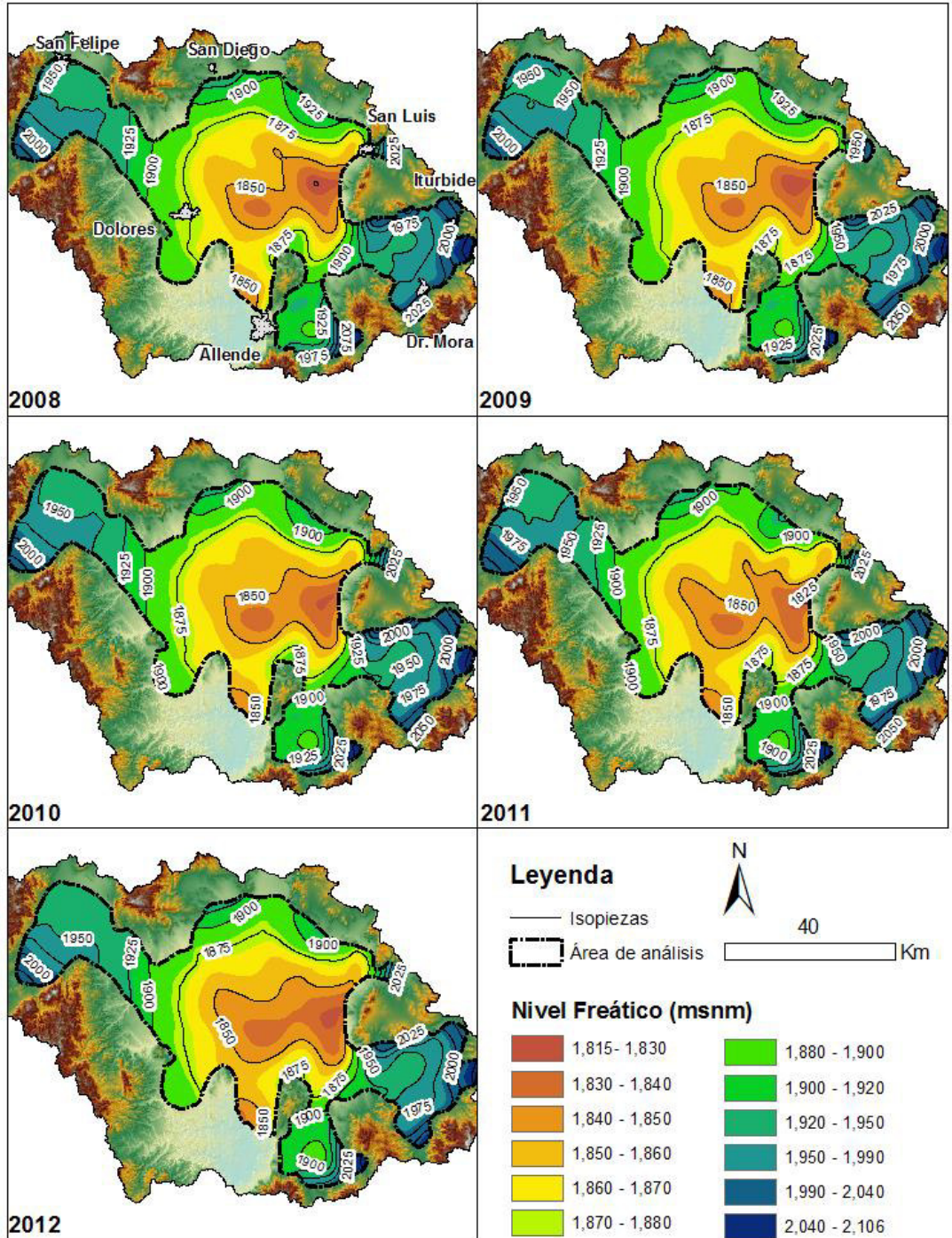


Figura 31. Mapas de predicción del nivel freático para los años 2008-2012.

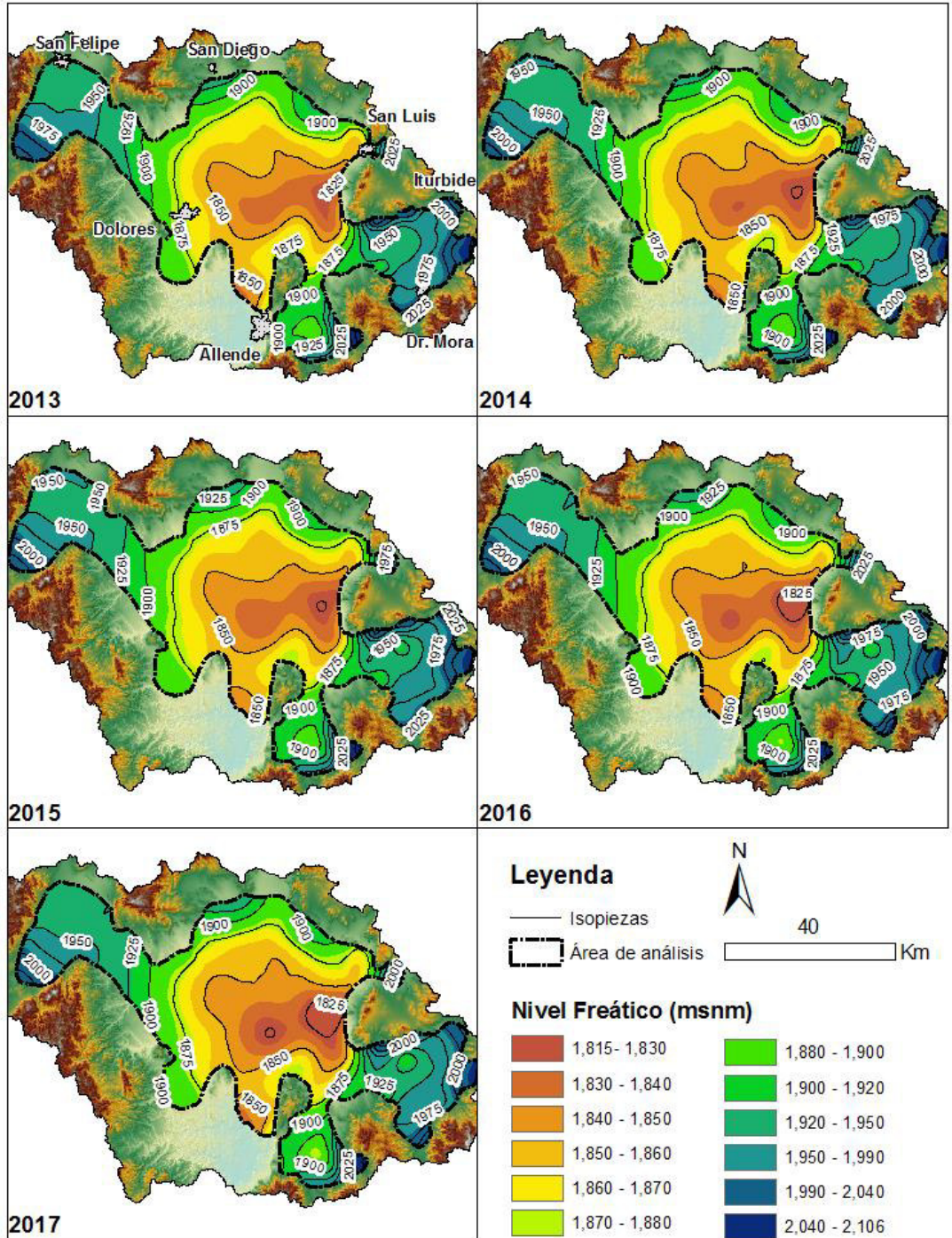


Figura 32. Mapa de predicción del Nivel freático para los años 2013-2017.

IV.4.5 Análisis espacial de la evolución del nivel freático por acuífero.

A continuación, se presenta un compendio de mapas con la predicción del nivel freático del modelo geoestadístico EBK para cada acuífero en el periodo de análisis 2008-2017.

IV.4.5.1 Acuífero Laguna Seca (LS).

El acuífero Laguna Seca mostró en el periodo de análisis una configuración de su nivel freático donde las zonas de recarga se encuentran en el norte y sur del acuífero, las zonas con menor NF se encuentra en el centro. La parte central denota un gran cono de abatimiento hacia donde todo el flujo del agua subterránea se dirige. Temporalmente se aprecia que este cono de abatimiento aumentó su área año tras año, esto relacionado con la sobreexplotación del agua subterránea en el acuífero. El último año presenta el mayor crecimiento del cono de abatimiento lo que mantuvo una tendencia descendente del NF.

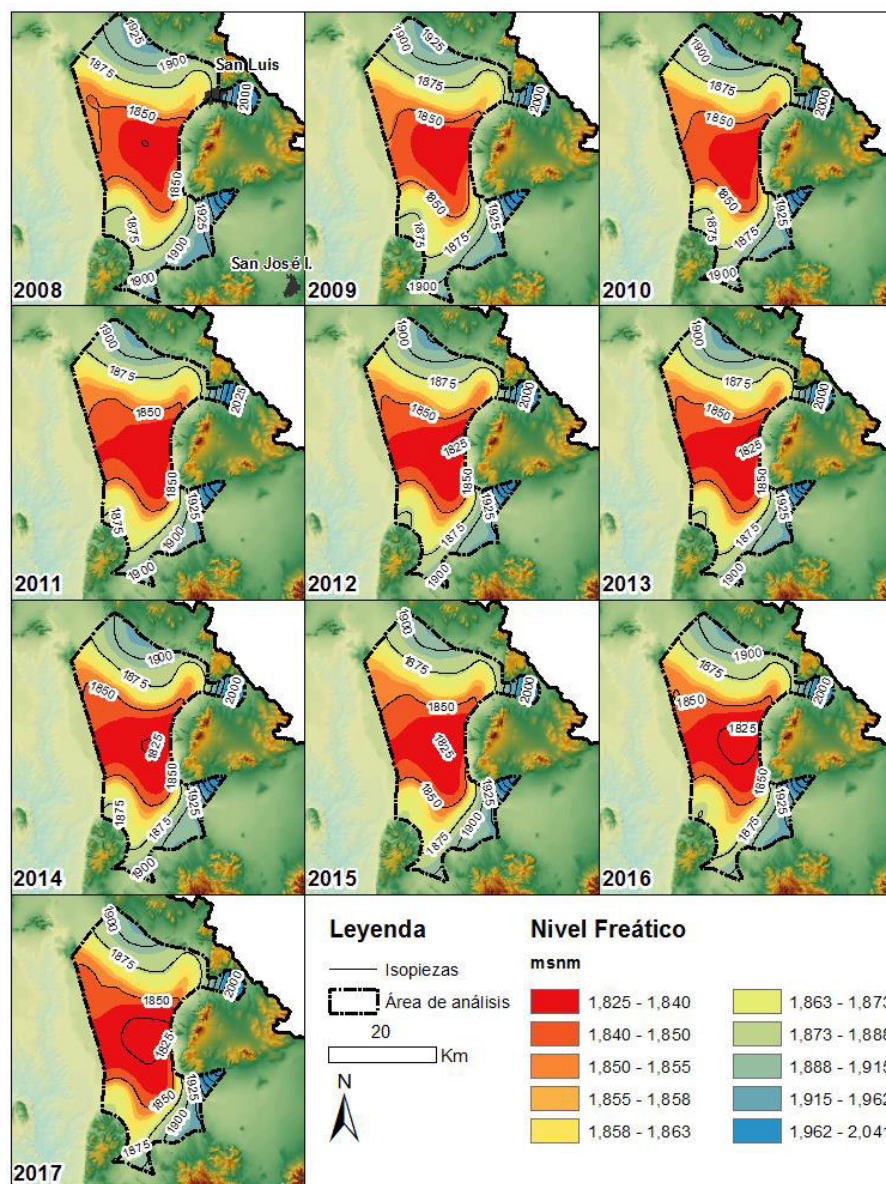


Figura 33. Evolución del Nivel Freático del acuífero Laguna Seca.

IV.4.5.2 Acuífero Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ).

EL acuífero Dr. Mora – San José Iturbide mostró en el periodo de análisis una configuración del NF donde el máximo valor se encuentra en las partes norte, este y sur del acuífero. Los NF de menor valor son en la parte oeste del acuífero y al centro donde se observa un cono de abatimiento que aumenta de extensión a través de los años evaluados. En todos los años se observó que la dirección del flujo de agua subterránea proviene de las zonas de moña o zonas de recarga con dirección al oeste, lo que indica que existe conexión al acuífero Laguna Seca pero debido a la sobreexplotación se forma un cono de abatimiento en el centro de este acuífero.

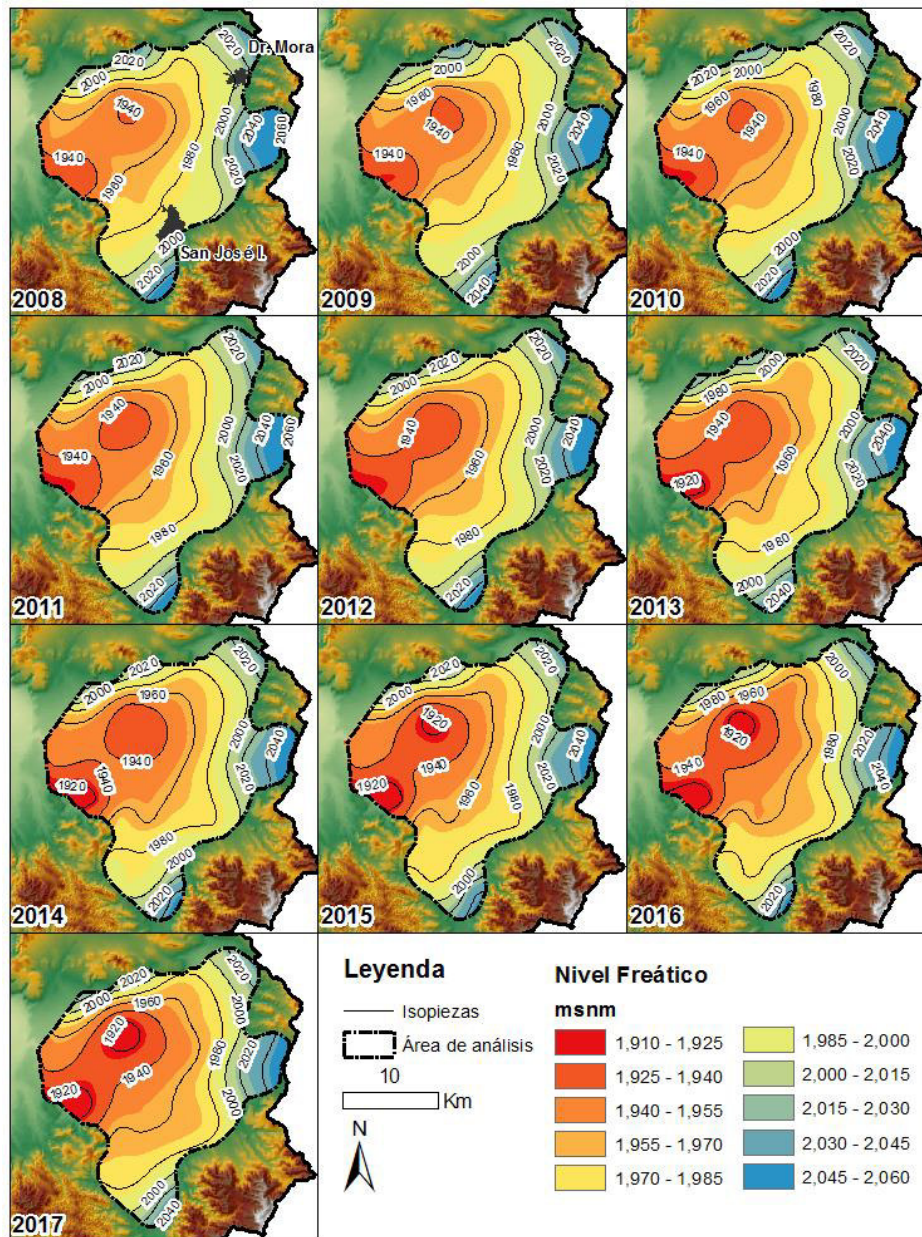


Figura 34. Evolución del Nivel Freático del acuífero Dr. Mora - San José Iturbide.

IV.4.5.3 Acuífero San Miguel de Allende (SMA).

El NF del acuífero San Miguel de Allende mostró en el periodo de análisis que su principal zona de recarga está al oeste del acuífero y las zonas de menor NF se encuentran en el centro del acuífero producto de un cono de abatimiento en esta parte del acuífero.

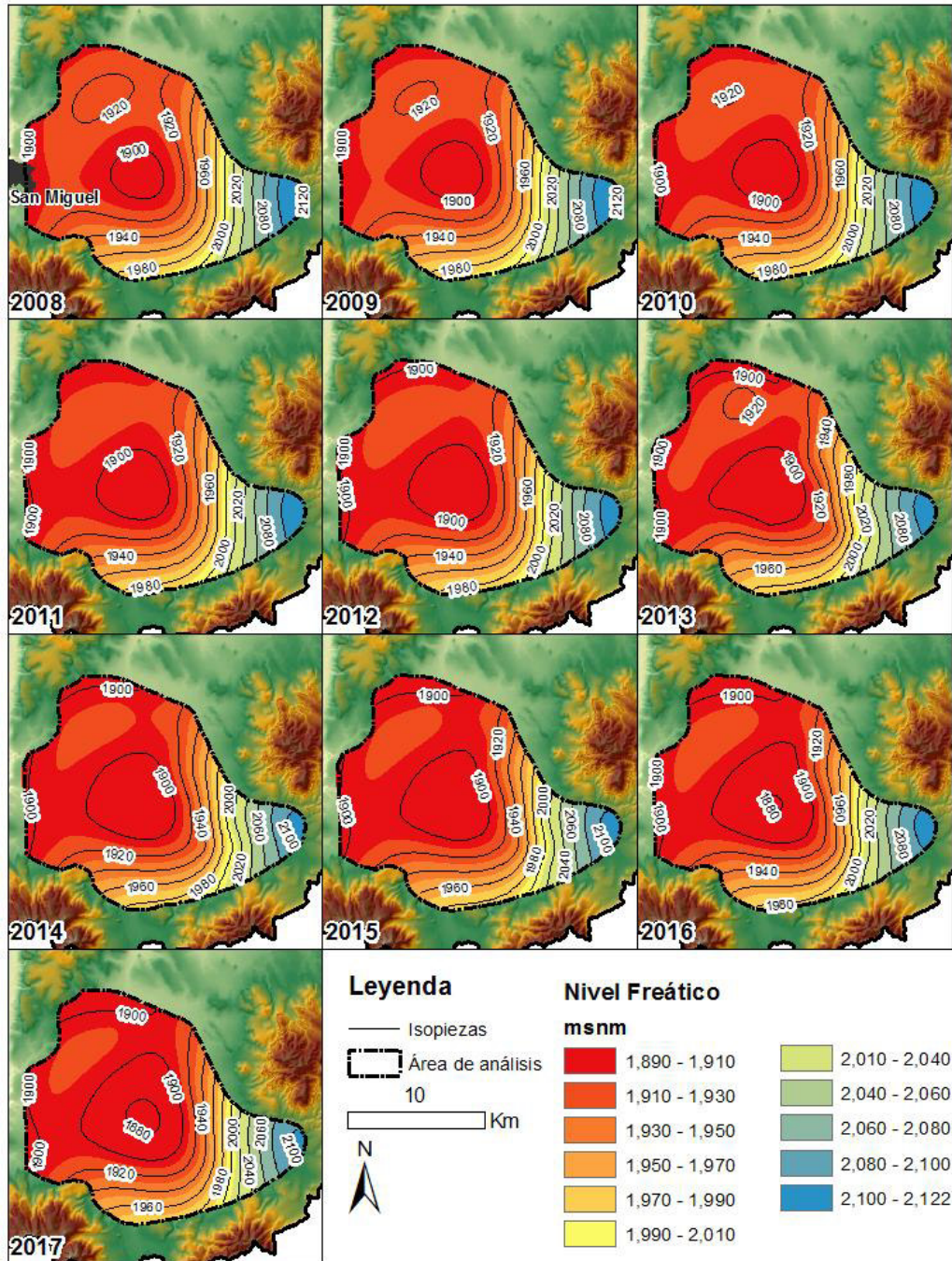


Figura 35. Evolución del Nivel Freático del acuífero San Miguel de Allende.

IV.4.5.4 Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL).

El acuífero Cuenca Alta del Río Laja presenta su principal recarga en la zona noroeste y norte. Las zonas de menor cota se encuentran en el centro del acuífero donde se forma un gran cono de abatimiento que comparte con el acuífero Laguna Seca. De igual forma que en el acuífero LS el cono de abatimiento mostró un aumento de su radio si se observa la isopieza de valor 1850 msnm, lo cual está relacionado con el problema de sobreexplotación el cual se mantuvo a través de los años evaluados.

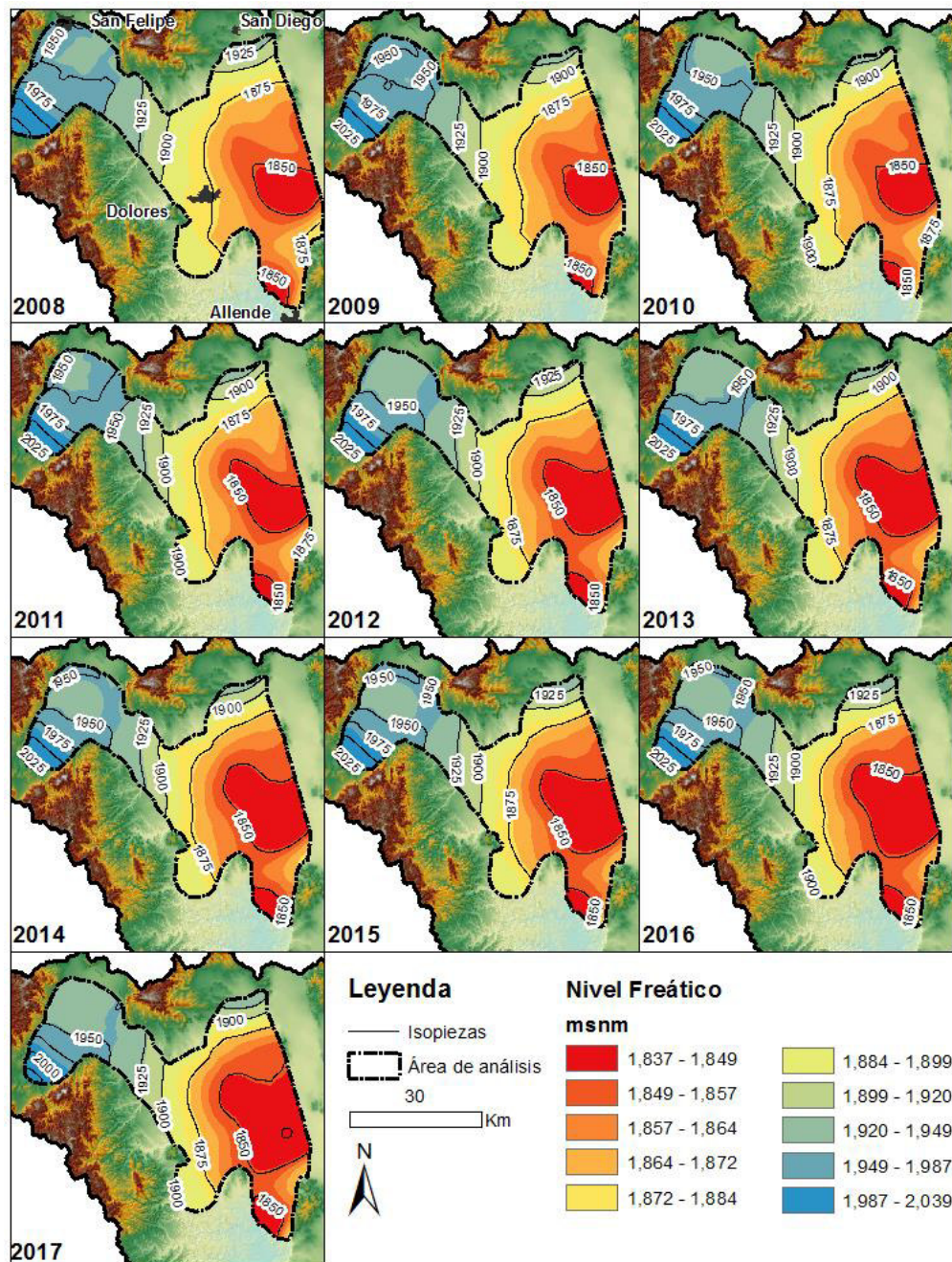


Figura 36. Evolución del Nivel Freático del acuífero Cuenca Alta del Río Laja.

IV.5 VELOCIDAD DEL NIVEL FREÁTICO

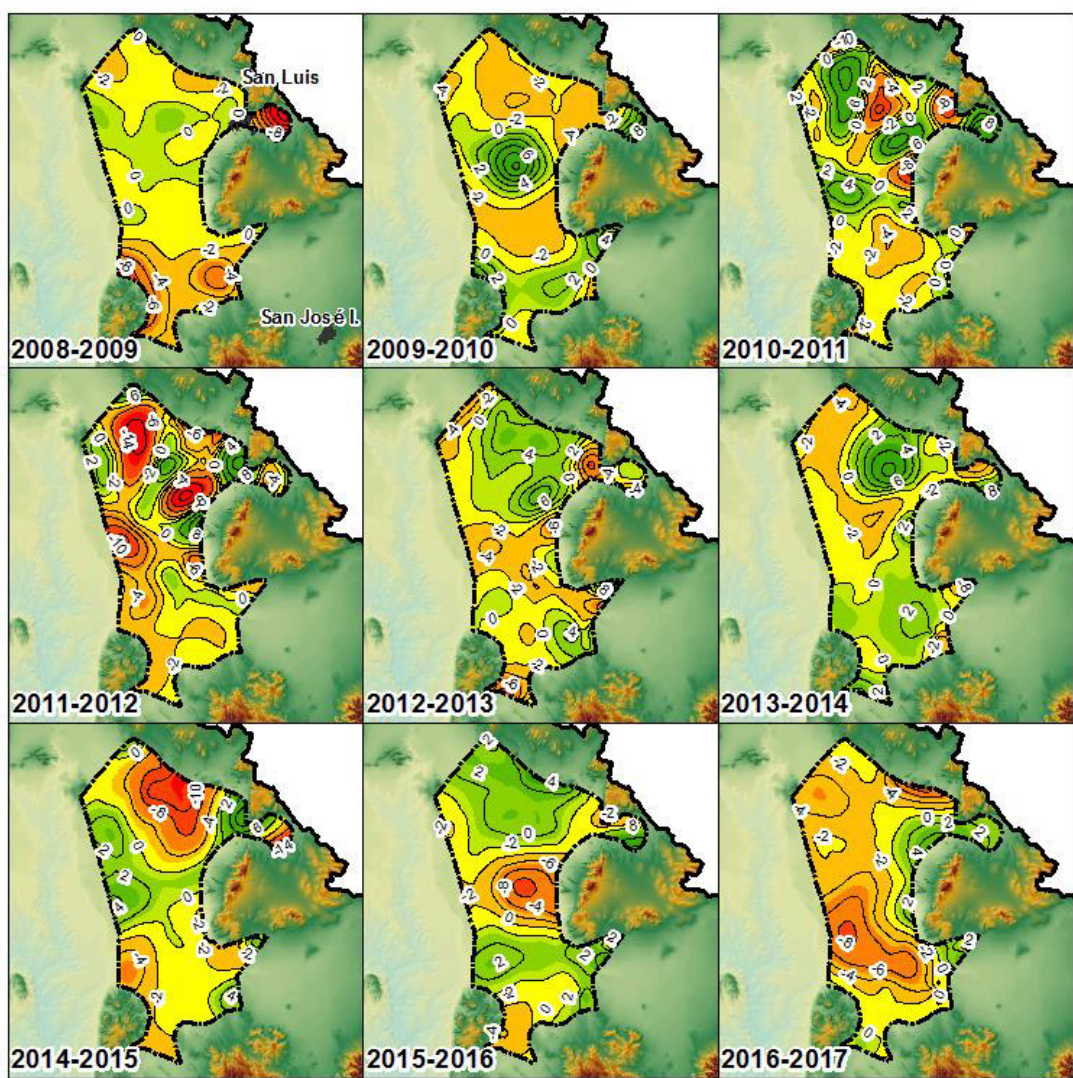
IV.5.1 Acuífero Laguna Seca (LS)

La velocidad promedio del acuífero Laguna Seca para cada periodo se presenta en la Tabla 15. Esta tabla muestra que la velocidad promedio anual del nivel freático se mantiene durante todo el periodo de análisis (el nivel fue aumentando su profundidad año con año). Los periodos con mayor descenso (valores negativos de velocidad) fueron el periodo 2011-2012 y el periodo 2016-2017. Mientras tanto el periodo 2013-2014 obtuvo un casi nulo descenso. Sin embargo, no todo el acuífero tiene problemas de descenso, ya que existen zonas donde hay recuperación del nivel freático (valores positivos de la velocidad) mostrados en la Figura 37.

Comparando los promedios anuales de velocidad del nivel freático de la Tabla 15 con el correspondiente mapa de la Figura 37, los periodos que presentan mayor descenso del nivel freático son en el periodo 2011-2012 y el periodo 2016-2017. Para el periodo 2011-2012 se evaluó un descenso promedio de -2.63 m/año y el mapa de la velocidad de este periodo muestra que la parte central y norte del acuífero concentran las principales zonas de descenso, donde el máximo valor de descenso llega a los 14 m/año. Por otra parte, el periodo 2016-2017 muestra una velocidad promedio de -2.52 m/año y los principales descensos se generan al sur del acuífero.

Los periodos en los que la velocidad promedio no es tan negativa son 2009-2010, 2010-2011, 2012-2013, 2013-2014 y 2015-2016. En estos periodos se observa una mayor superficie con recuperación (valores positivos de la velocidad) pero que en promedio no revierte la tendencia general del acuífero.

Los mapas de velocidad (Figura 37) muestran que la recuperación y el descenso del nivel freático pueden ocurrir alternadamente entre distintos periodos de tiempo evaluados.



Leyenda

- Isopiezas
- ▭ Área de análisis
- 25
- Km
- N

Velocidad de descenso del nivel freático

m/año

| | | | |
|--|--------|--|-----------|
| | 12 - 5 | | 0 - -2 |
| | 5 - 3 | | -2 - -5 |
| | 3 - 1 | | -5 - -8 |
| | 1 - 0 | | -8 - -11 |
| | | | -11 - -15 |

2017

Figura 37. Mapas de velocidad del nivel freático en el acuífero Laguna Seca.

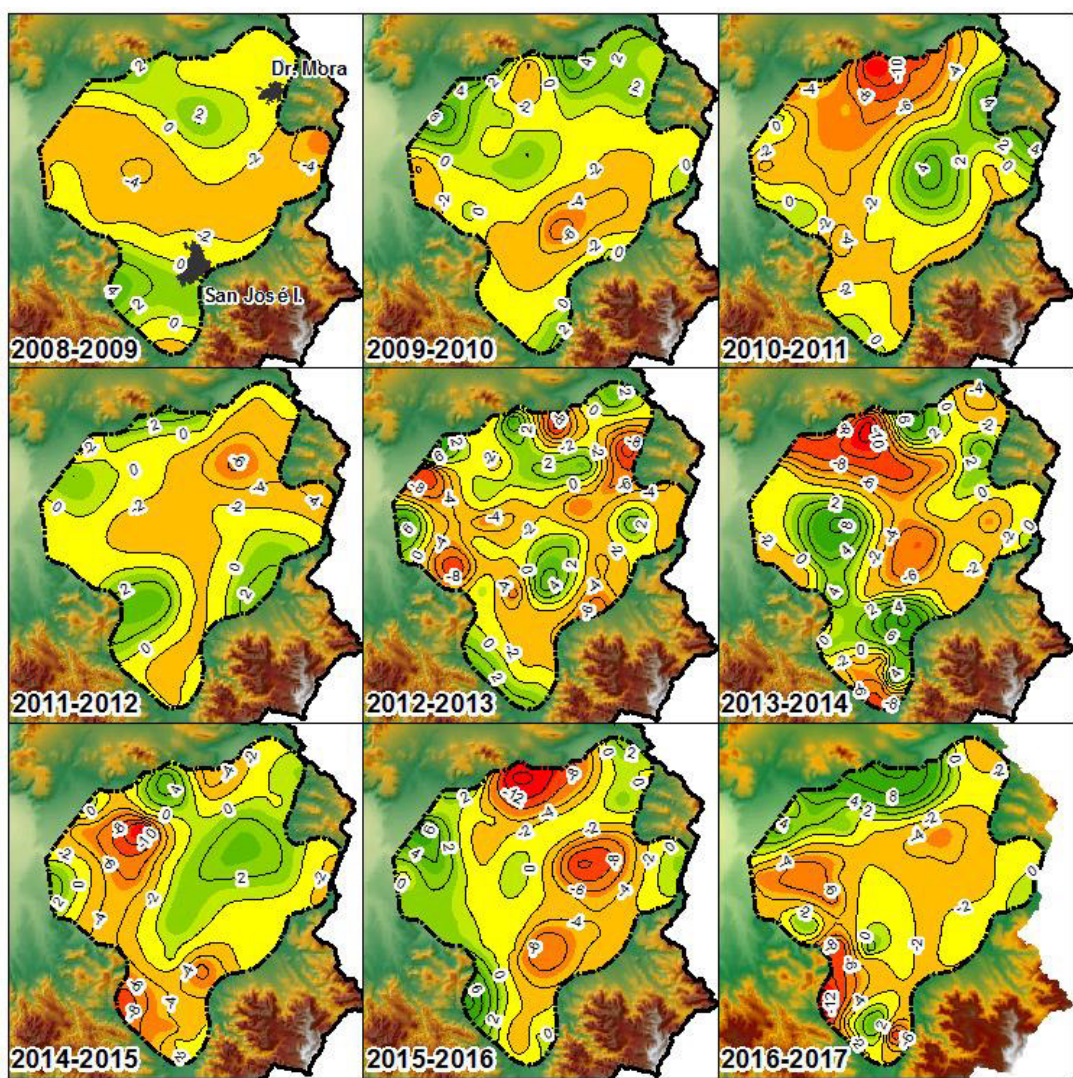
Tabla 15. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero Laguna Seca para los distintos periodos analizados.

| Periodo | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Velocidad del nivel freático (m/año) | -1.73 | -0.39 | -0.17 | -2.63 | -0.22 | -0.04 | -1.68 | -0.09 | -2.52 |

IV.5.2 Acuífero Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ)

Los valores de la velocidad promedio del nivel freático, por periodo mostrados en la Tabla 16, indican que el nivel freático del acuífero Dr. Mora – San José Iturbide desciende año con sin recuperación aparente. Las mayores velocidades promedio de descenso (velocidades negativas) se registraron en los periodos del 2010-2011 y el 2015-2016 siendo un poco mayores a los -2 m/año. El menor descenso promedio aparentemente fue para el periodo 2009-2010 con -0.71 m/año.

Los periodos en los que se evaluaron los mayores descensos en la Figura 38 son el 2010-2011, 2013-2014 y 2015-2016. Para estos periodos algunas zonas llegan hasta los -12 m/año de en la parte norte del acuífero. De igual forma en esta parte norte ocurre la mayor recuperación en el periodo 2016-2017 con zonas que muestran velocidades positivas de hasta 2 m/año. Las zonas de descenso y recuperación se intercalan periodo tras periodo. Esto posiblemente se deba a un efecto indirecto de la precipitación de cada año, donde si la precipitación es poca se intensifica la extracción de agua subterránea, y si la precipitación aumenta se tiene una menor necesidad de extracción de agua para riego.



Leyenda

— Isopiezas
 [Dashed Box] Área de análisis
 10 Km
 N

Velocidad de descenso del nivel freático

m/año

| | |
|--------|-----------|
| 12 - 5 | 0 - -2 |
| 5 - 3 | -2 - -5 |
| 3 - 1 | -5 - -8 |
| 1 - 0 | -8 - -11 |
| | -11 - -15 |

Figura 38. Mapas de velocidad del nivel freático en el acuífero Laguna Seca

Tabla 16. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero Dr. Mora - San José Iturbide para los distintos periodos analizados.

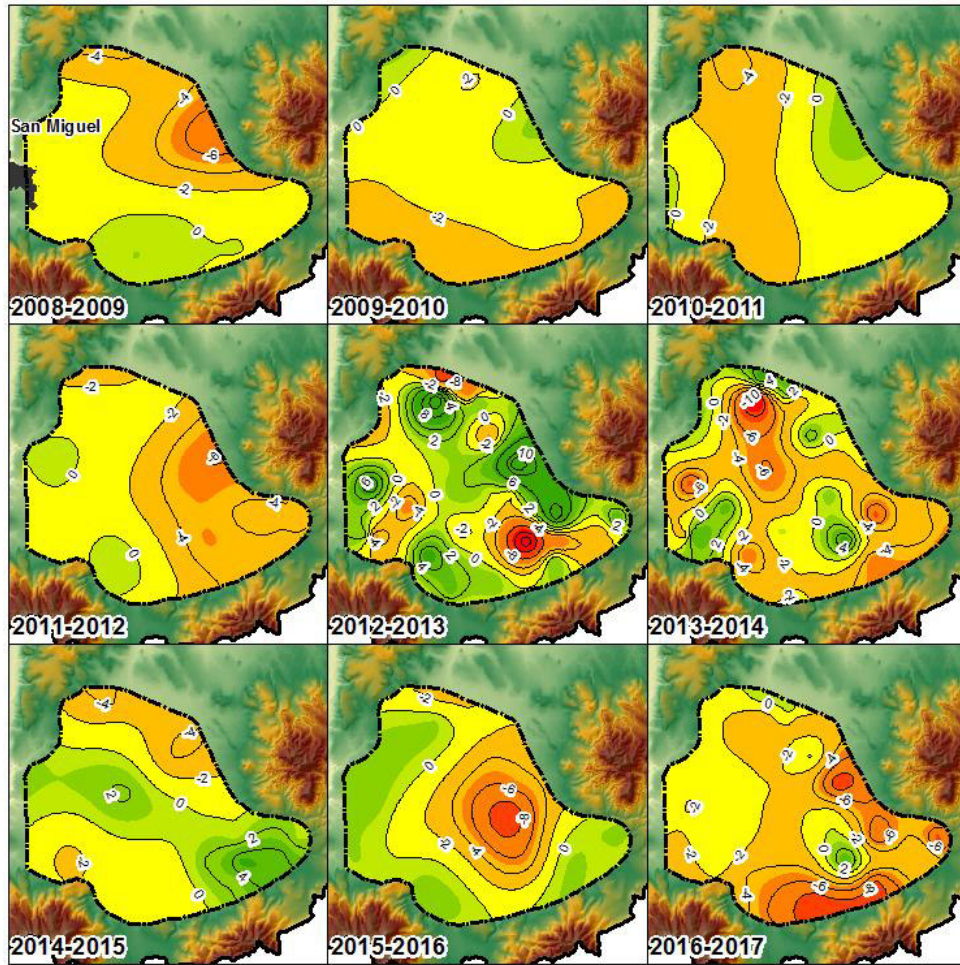
| Periodo | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Velocidad del nivel freático (m/año) | -1.31 | -0.71 | -2.04 | -1.22 | -1.74 | -1.76 | -1.57 | -2.02 | -1.51 |

IV.5.3 Acuífero San Miguel de Allende (SMA)

El comportamiento de la velocidad del nivel freático en el acuífero San Miguel de Allende muestra que este desciende periodo tras periodo, con excepción del periodo 2012-2013 cuando la velocidad promedio es positiva e implica recuperación en el área. La mayor velocidad negativa se registró el último período evaluado, el 2016-2017, y fue de -3.06 m/año (Tabla 17).

Después de analizar los datos de la Tabla 17 y los mapas de la Figura 39, se observó que los periodos 2011-2012, 2013-2014 y 2016-2017 presentan las áreas de descenso más extensas con valores de hasta -10 m/año. Sin embargo, el mapa de velocidad del nivel freático, del periodo 2012-2013, muestra un valor promedio de 0.48 m/año con áreas de recuperación que llegan hasta los 10 m/año.

Las zonas de descensos y recuperaciones se intercalan periodo con periodo situación indirectamente dependiente la precipitación que se tiene cada año.



Legenda

— Isopiezas
 [] Área de análisis
 10 Km
 N

Velocidad de descenso del nivel freático

| m/año | |
|--------|-----------|
| 12 - 5 | 0 - -2 |
| 5 - 3 | -2 - -5 |
| 3 - 1 | -5 - -8 |
| 1 - 0 | -8 - -11 |
| | -11 - -15 |

Figura 39. Mapas de Velocidad del nivel freático en el acuífero San miguel de Allende.

Tabla 17. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero San Miguel de Allende para los distintos periodos analizados.

| Periodo | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 |
|--------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Velocidad del nivel freático (m/año) | -1.63 | -1.42 | -1.59 | -2.23 | 0.48 | -2.24 | -0.23 | -1.40 | -3.06 |

IV.5.4 Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL)

El acuífero Cuenca Alta del Río Laja presenta velocidades del nivel freático negativas en casi todos sus periodos evaluados, con excepción del periodo 2014-2015 con una velocidad promedio positiva que implica recuperación del NF.

Los valores de la Tabla 18 muestran que los periodos con mayor descenso del NF fueron en el 2011-2012 y el 2016-2017. Si se observan los mapas de velocidad de la Figura 40 para estos periodos, es posible identificar áreas extensas con velocidades negativas.

Mientras tanto el período 2014-2015, se registró una velocidad promedio de 1.34 m/año, lo cual implica recuperación, y su mapa de velocidad correspondiente muestra que la mayor parte del área del acuífero muestra valores positivos de la velocidad del nivel freático.

De igual forma que los acuíferos anteriormente analizados, los descensos y recuperaciones se presentan en las mismas zonas intercalándose en el transcurso de cada periodo.

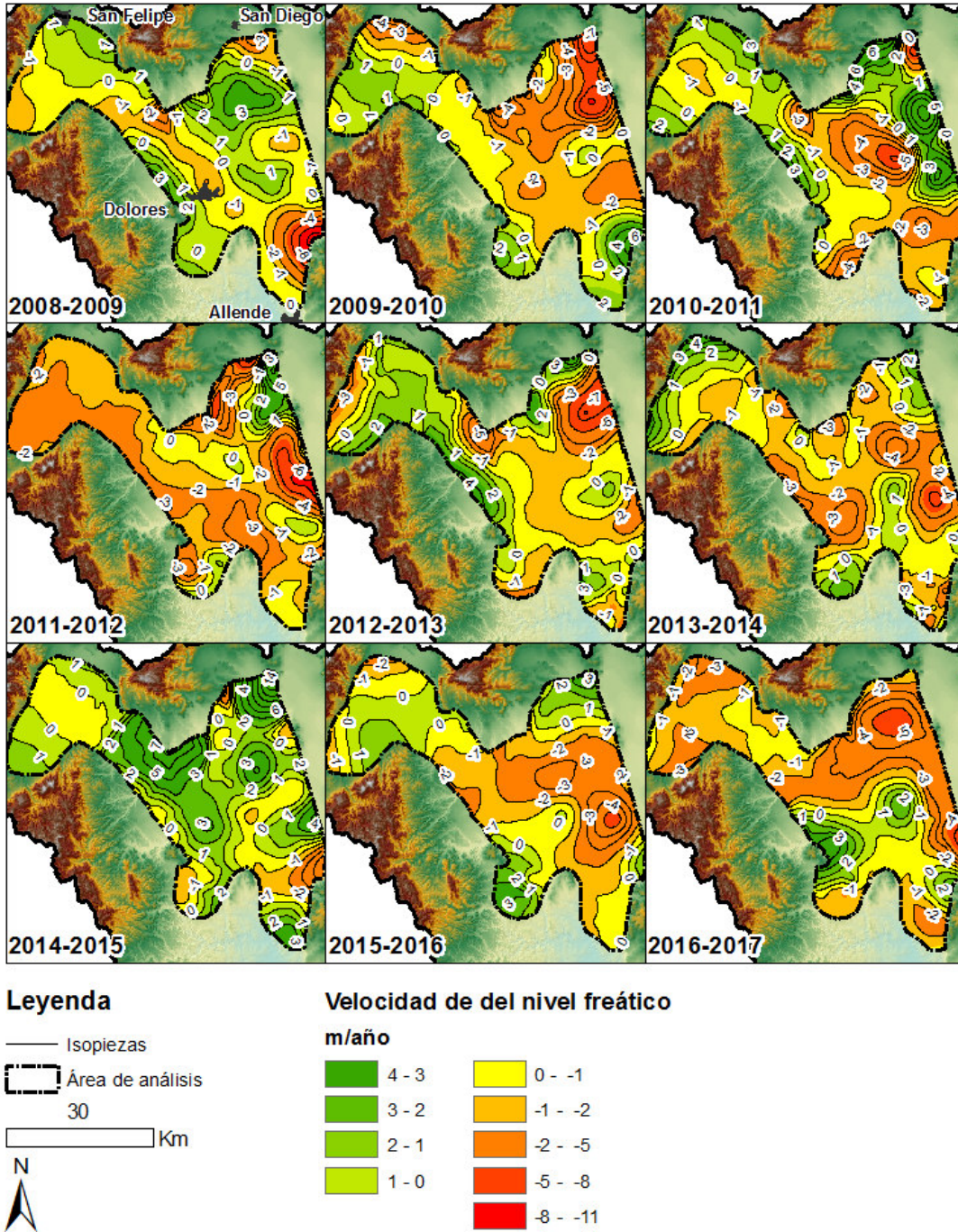


Figura 40. Mapas de velocidad del nivel freático en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja.

Tabla 18. Velocidad promedio del nivel freático del acuífero Cuenca Alta del Río Laja para los distintos periodos analizados.

| Periodo | 2008-2009 | 2009-2010 | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | 2013-2014 | 2014-2015 | 2015-2016 | 2016-2017 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Velocidad de descenso (m/año) | -0.20 | -1.10 | -0.21 | -1.77 | -0.60 | -0.98 | 1.34 | -0.86 | -1.52 |

IV.5.5 Promedio en la Cuenca Independencia

La velocidad promedio del nivel freático, del periodo 2008-2017, en la Cuenca Independencia es de -1.18 m/año (Figura 41). Lo que implica que, en promedio, durante todo el periodo de análisis, la cuenca mantiene un descenso constante.

Las mayores velocidades negativas del nivel freático se encuentran en la parte central en todos los acuíferos, donde se presentan conos de abatimiento. Las únicas zonas donde se observó que los niveles freáticos se mantienen con velocidades próximas a cero, e incluso con valores positivos de la velocidad (recuperación), es en la periferia de la CI, donde se encuentran las zonas de recarga. La velocidad promedio del NF para el periodo 2008-2015 mostró que en la mayor parte de la CI la profundidad del nivel freático está aumentando de forma constante. Los mayores descensos durante el periodo de análisis se localizaron en la parte norte del acuífero DMSJ.

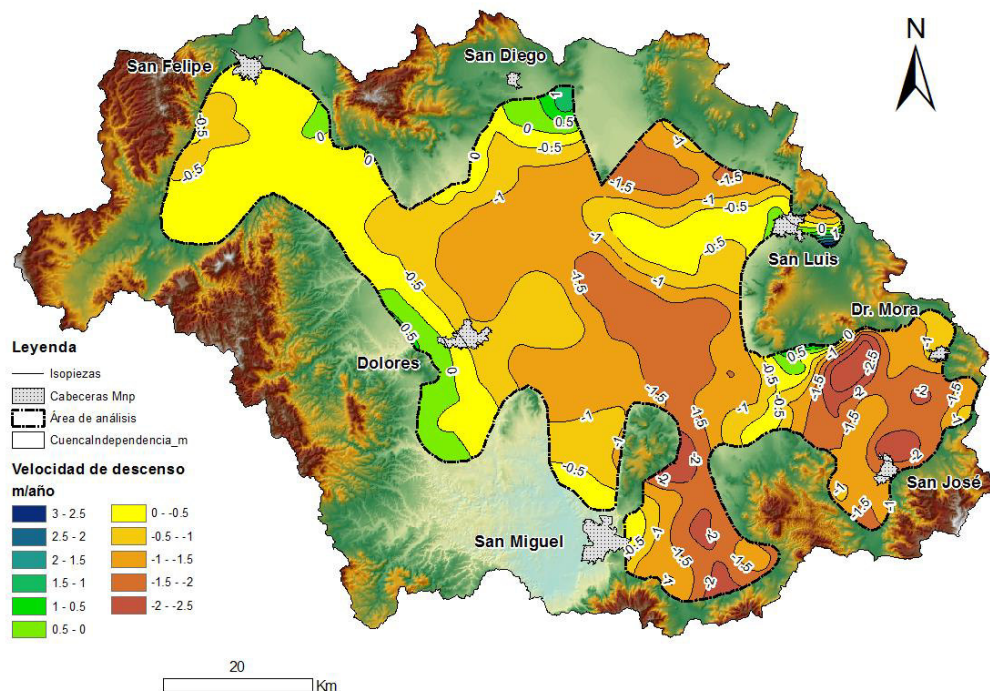


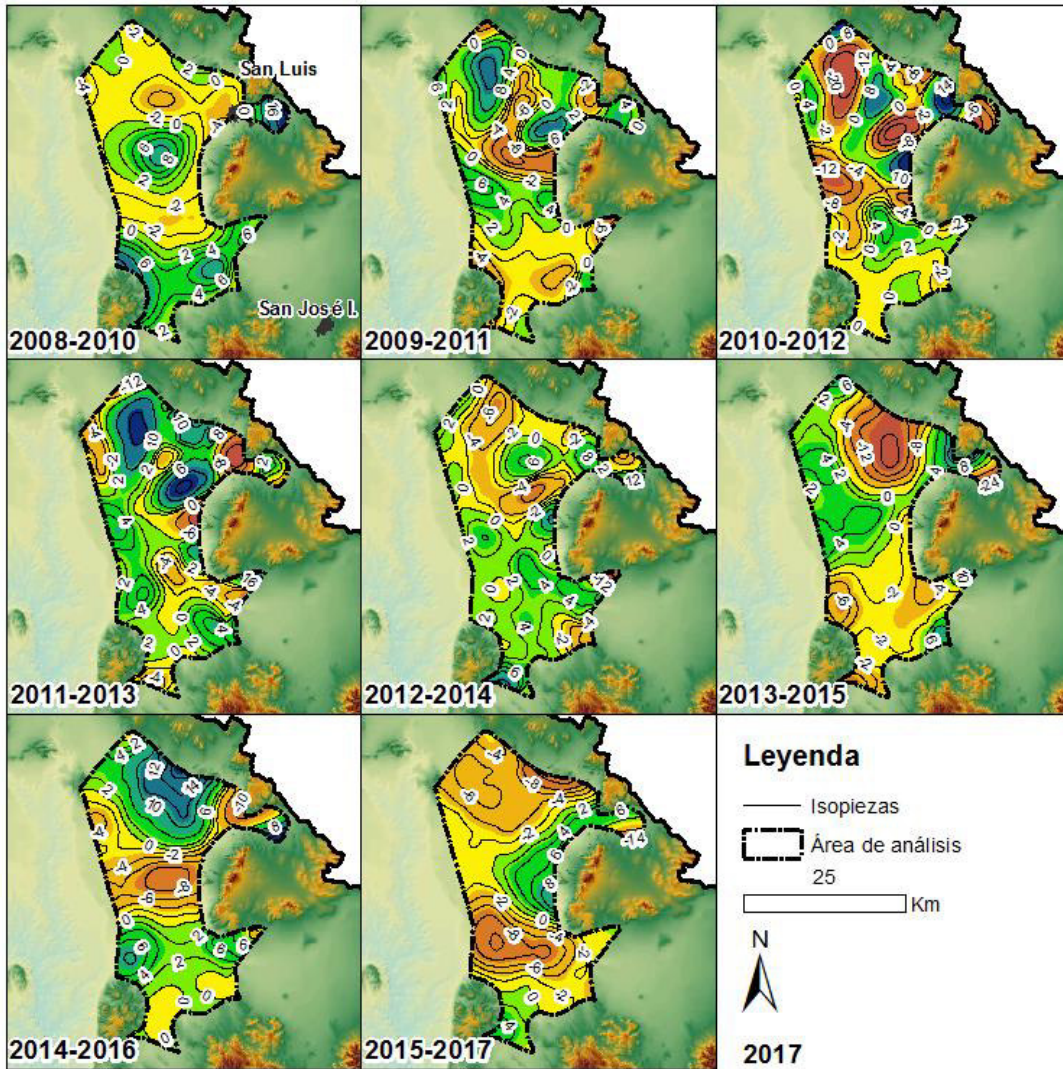
Figura 41. Velocidad promedio del nivel freático, periodo 2008-2017, en la Cuenca Independencia.

IV.6 ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

Los mapas de aceleración del nivel freático pueden ser útiles para identificar áreas de interés donde la velocidad del nivel freático está cambiando (posible presencia de pozos ilegales, cambios en las propiedades del acuífero, otras causas).

IV.6.1 Acuífero Laguna Seca (LS)

Los mapas de aceleración del nivel freático de la Figura 42, representan las zonas donde se incrementó la extracción de agua subterránea y por ende el aumento de la profundidad de la capa freática. Los periodos que muestran las mayores aceleraciones negativas, que se encuentran en el rango de -14 m/año a -22 m/año fueron 2010-2012 y 2013-2015. Además, el periodo 2015-2017 presenta la mayor extensión de área que muestra aceleración del descenso del nivel freático. Comparando el resultado que muestra los mapas de aceleración de extracción con los valores promedios de aceleración del nivel freático de la Tabla 19, indica que las temporadas mencionadas son las únicas que promedian aceleraciones negativas, por lo cual estos periodos son los que se encontraron con mayor sometimiento de extracción de agua subterránea.



Aceleración de descenso del nivel freático

m/año²

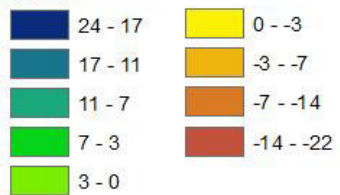


Figura 42. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero Laguna Seca.

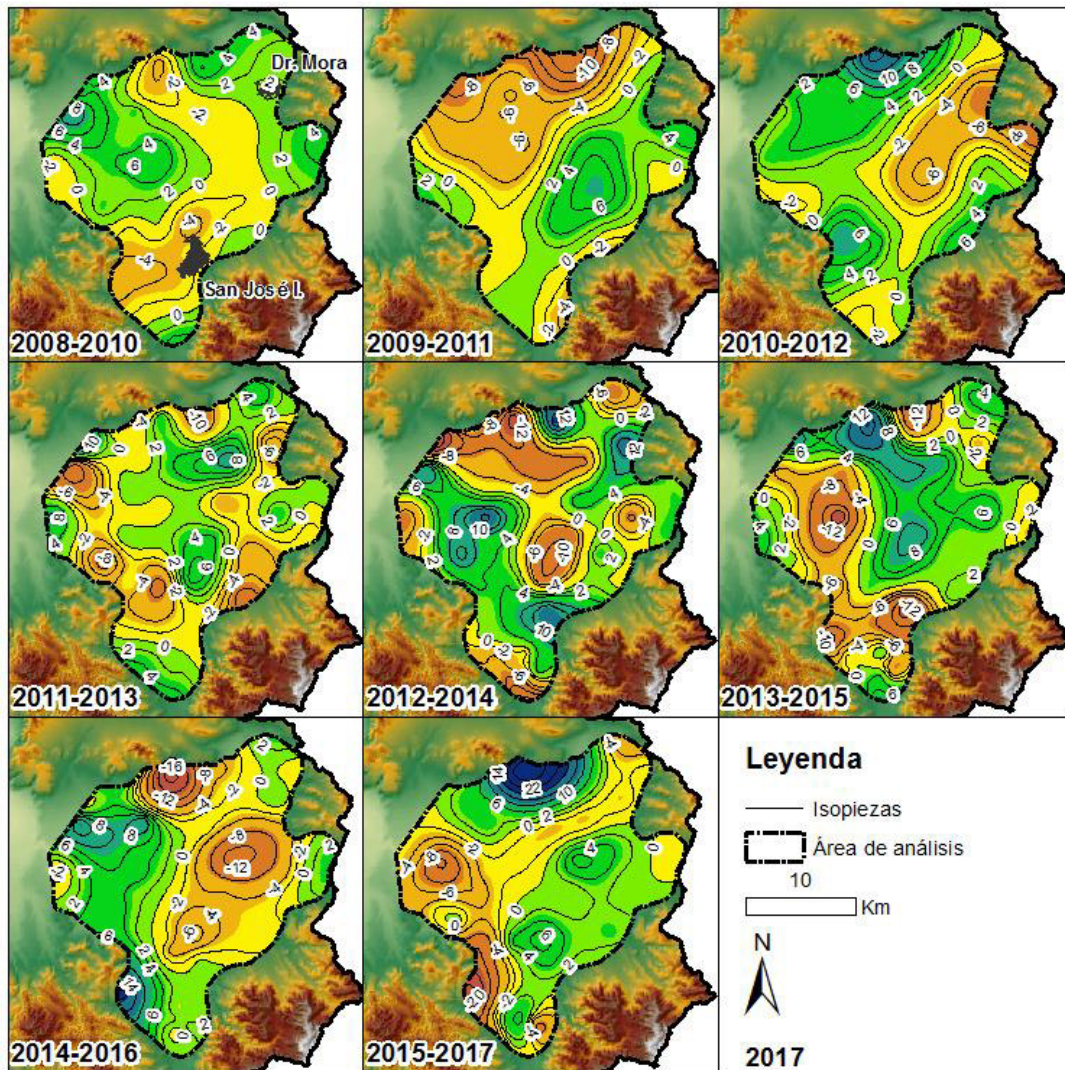
Tabla 19. Aceleración promedio del nivel freático en el acuífero Laguna Seca para los distintos periodos analizados.

| Periodo | 2008-2010 | 2009-2011 | 2010-2012 | 2011-2013 | 2012-2014 | 2013-2015 | 2014-2016 | 2015-2017 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Aceleración del nivel freático (m/año ²) | 1.34 | 0.21 | -2.46 | 2.41 | 0.18 | -1.65 | 1.59 | -2.43 |

El periodo con valor positivo de la aceleración del nivel freático mostrado en la Tabla 19 es el período 2011-2013. El mapa de este periodo, la Figura 42, muestra un incremento importante de las áreas con aceleración positiva, lo que representa que este período fue el que tuvo la mayor recuperación en todos los periodos analizados del acuífero LS.

Cabe señalar que los periodos 2009-2011, 2010-2012, 2011-2013 y 2012-2014, al analizar los cambios que ocurrieron en estos periodos, su parte norte presenta cambios intercalados de aceleración positiva a negativa y viceversa en la misma extensión de área, indicando que después de una temporada de recuperación se presenta un periodo de gran extracción de agua subterránea. Esto denota que esta área del acuífero es muy susceptible a los cambios de recarga y extracción. Geológicamente (Figura 8) se presentan afloramientos de roca consolidada, lo que explica la forma que toman estas áreas de aceleración del nivel freático. Este afloramiento también indica un contacto del acuífero superficial y el acuífero fracturado lo que caracteriza esta zona a tener grandes cambios en el nivel freático al interactuar entre dos acuíferos de porosidad distinta. De igual forma los últimos tres periodos experimentaron estos cambios.

IV.6.2 Acuífero Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ)



Aceleración de descenso del nivel freático

m/año²

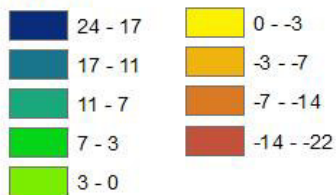


Figura 43. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero Dr. Mora – San José Iturbide.

Los mapas de aceleración del nivel freático del acuífero Dr. Mora – San José Iturbide (DM-SJ) de la Figura 43, muestra que el periodo 2009-2011 es el de mayor superficie con aceleración negativa, de igual forma, en la Tabla 20 de aceleraciones promedios muestra que este periodo es el mayor aceleración negativa y en promedio alcanzó los -1.33 m/año^2 .

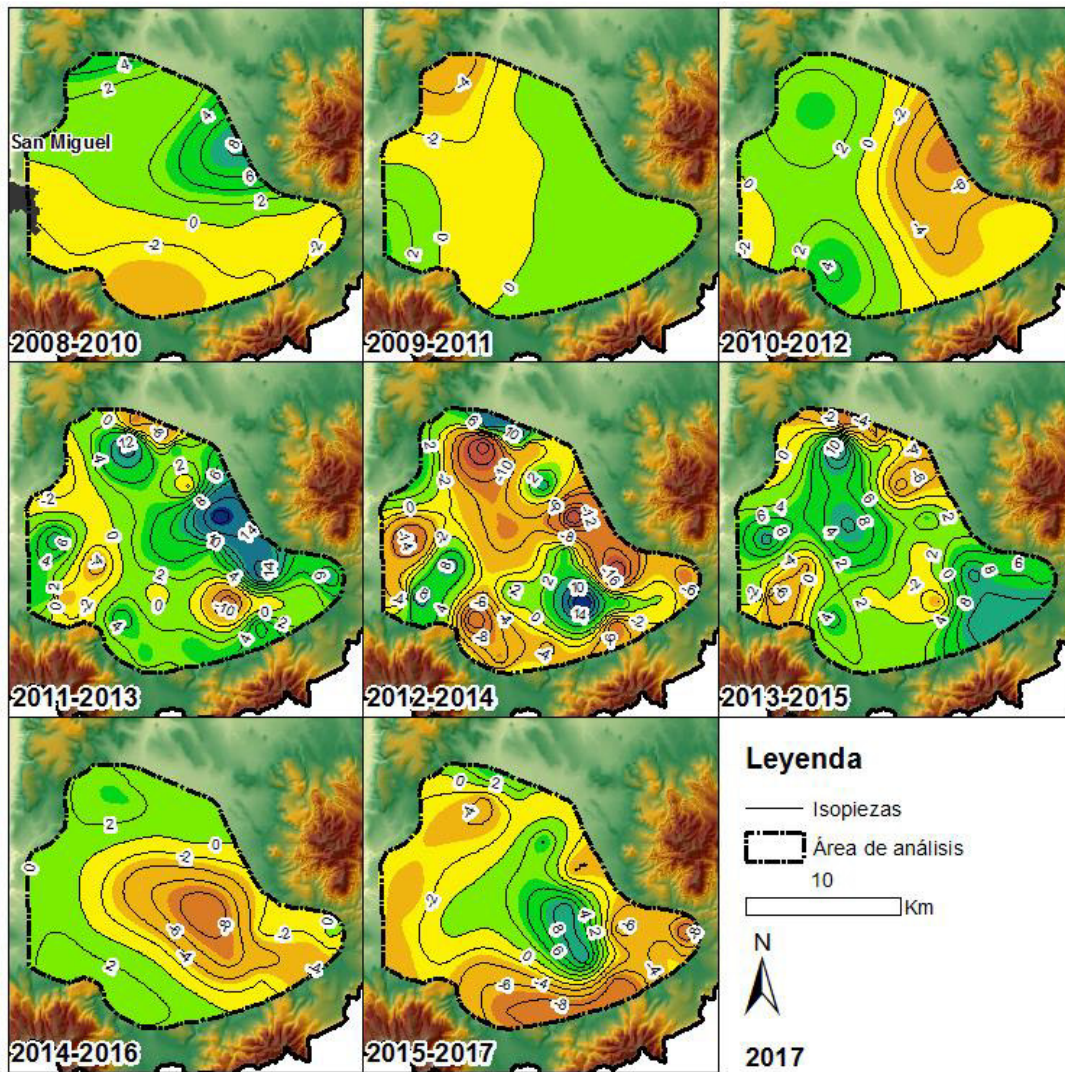
Tabla 20. Aceleración promedio del nivel freático en el acuífero Dr. mora - San José Iturbide.

| Periodo | 2008-2010 | 2009-2011 | 2010-2012 | 2011-2013 | 2012-2014 | 2013-2015 | 2014-2016 | 2015-2017 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Aceleración del descenso (m/año²) | 0.60 | -1.33 | 0.82 | -0.52 | -0.02 | 0.19 | -0.46 | 0.52 |

La Tabla 20 muestra que la primera y última periodo son las de mayor recuperación, presentando valores positivos de aceleración de 0.60 y 0.52 respectivamente.

El acuífero DM-SJ presenta cambios en la aceleración de descenso en toda el área de análisis intercalándose por periodos con recarga y periodos con fuertes aceleraciones pero puede observándose donde ocurren los cambios más pronunciados se encuentra a las partes cercanas a zonas de montaña, donde el material rocoso representa a un acuífero fracturado lo cual puede fungir como zona con propiedades que permitan estos fuertes cambios en el nivel freático.

IV.6.3 Acuífero San Miguel de Allende (SMA)



Aceleración de descenso del nivel freático

m/año²

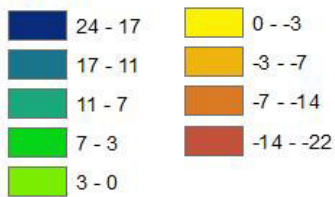


Figura 44. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero San Miguel de Allende.

Comparando los datos de la Tabla 21 y los mapas Figura 44 se identifica que el periodo donde aumento la aceleración negativa del nivel freático fue 2012-2014, periodo cuando hubo un mayor aumento en la extracción del agua subterránea en la parte central del acuífero San Miguel de Allende.

Tabla 21. Aceleraciones promedios del nivel freático en el acuífero San Miguel de Allende.

| Periodo | 2008-2010 | 2009-2011 | 2010-2012 | 2011-2013 | 2012-2014 | 2013-2015 | 2014-2016 | 2015-2017 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Aceleración del descenso (m/año²) | 0.21 | -0.17 | -0.64 | 2.71 | -2.72 | 2.00 | -1.17 | -1.66 |

La Tabla 21 muestra el periodo de mayor recuperación 2011-2013 donde su mapa de aceleración muestra que las mayores aceleraciones positivas se produjeron al noroeste del acuífero (Figura 44).

Se puede observar que en los mapas de aceleración (Figura 44) de los periodos 2011-2013, 2012-2014 y 2013-2015, la configuración de los valores de aceleración son similares solamente que el valor se invierte (de recuperación a descenso) periodo tras periodo.

IV.6.4 Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL)

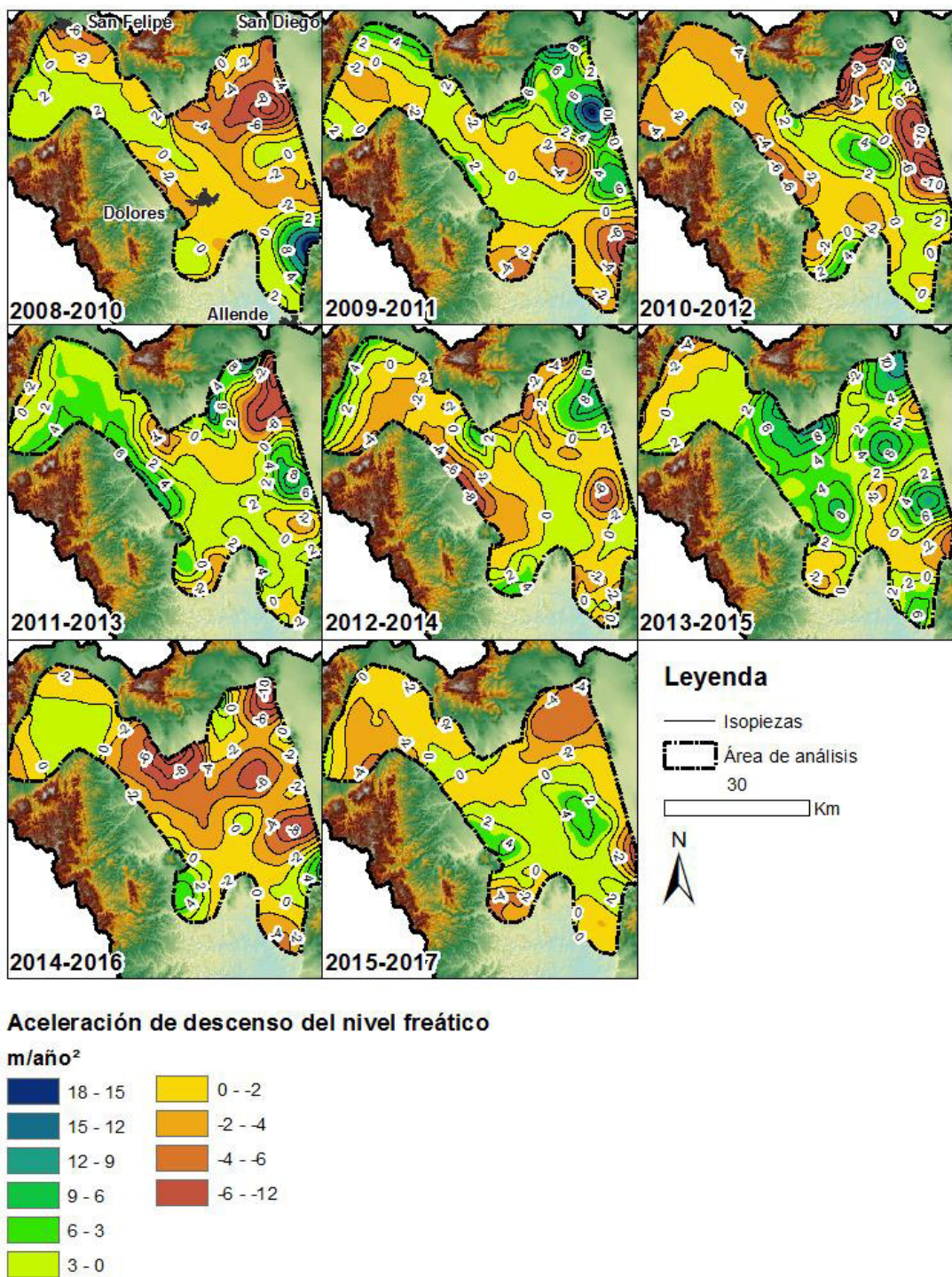


Figura 45. Mapas de aceleración del nivel freático del acuífero Cuenca Alta del Río Laja.

En los mapas de aceleración del nivel freático del Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL), de la Figura 45, se identifica que las mayores aceleraciones negativas fueron más frecuentes en las partes noreste y este del acuífero para los periodos 2008-2010, 2010-2012 y 2014-2016. El periodo 2013-2015 fue el periodo con mayor extensión de aceleración positiva (cambio hacia recuperación).

Corroborando lo anterior con los datos de aceleración promedio por periodo de la Tabla 22, el periodo donde la aceleración negativa promedio fue mayor es el 2014-2016 y el periodo donde se observó una mayor aceleración positiva fue en el 2013-2015.

Tabla 22. Aceleración promedio del nivel freático en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja.

| Periodo | 2008-2010 | 2009-2011 | 2010-2012 | 2011-2013 | 2012-2014 | 2013-2015 | 2014-2016 | 2015-2017 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Aceleración del descensos (m/año ²) | -0.90 | 0.89 | -1.56 | 1.16 | -0.37 | 2.31 | -2.20 | -0.65 |

Este acuífero presentó área con aceleraciones positivas intercaladas con aceleraciones negativas a través del paso de los periodos evaluados

IV.6.5 Promedio en la Cuenca Independencia

La aceleración negativa del nivel freático presentado en la Figura 46, durante el periodo de análisis 2008-2017, tiene como posible explicación las crecientes extracciones de agua subterránea (con posibilidad de pozos ilegales), aunque también puede deberse a una reducción de las propiedades hidrodinámicas del acuífero. Las aceleraciones negativas implican que el problema de sobreexplotación se está agravando, especialmente en la parte central y noro-central del área de estudio en la CI. El acuífero CARL en su parte noro-central, cercana a la cabecera municipal de San Diego de la Unión, presenta una gran área de aceleración negativa del NF con un rango de -0.4m/año a -0.8 m/año², en el mismo rango de aceleración negativa se observa la parte central del acuífero LS, el sur de SMA y DMSJ. Los municipios que tienen los mayores efectos por el aumento de la extracción de agua subterránea son San Diego de la Unión y San Luis de la Paz.

Además, se puede observar que en la cuenca CI hay zonas que tiene aceleraciones positivas con un valor máximo de +1.6 m/año², lo que implica que existen zonas en las que el cambio de la velocidad tiende hacia la recuperación. Una de estas zonas, al centro de la cuenca CI, está ubicada en un afloramiento riolítico formando una zona montañosa que al parecer genera recarga importante al manto freático, aunque también cabe la posibilidad de que las fallas que cruzan este afloramiento estén implicadas.

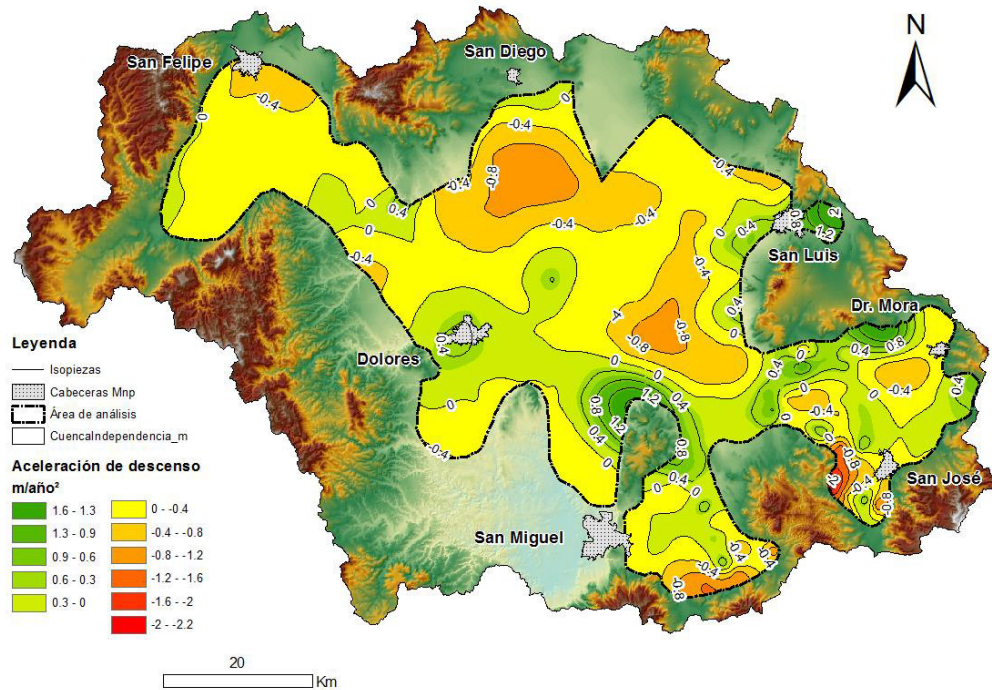


Figura 46. Aceleración promedio del periodo 2008-2017 de la Cuenca Independencia.

IV.7 IMPLICACIONES DE LA CLASIFICACIÓN DE LA VELOCIDAD Y ACELERACIÓN DEL NIVEL FREÁTICO

Para un correcto análisis del mapa de clasificación de la velocidad y aceleración del nivel freático, es necesario atender los cuatro casos ya mostrados en la metodología.

Caso 1: aceleración de la recuperación.

Caso 2: deceleración de la recuperación.

Caso 3: deceleración del descenso

Caso 4: aceleración del descenso.

La Figura 47 muestra los cuatro posibles casos en distintos colores y en la Tabla 23 se presenta el área en el que se extiende cada caso. El caso 1, aceleración de la recuperación, solo se presenta en una menor extensión cercanas a zonas de recarga, estas zonas están también próximas a las cabeceras municipales de Dolores, San Diego y San Luis. Con el caso 2, deceleración de la recuperación, como ocurre con el caso 1, sólo se presenta próxima a áreas de recarga. Mientras tanto el caso 3, deceleración del descenso, es el que presenta la segunda mayor área de extensión en el acuífero, esta zona tiene una velocidad negativa (descenso) pero con perspectiva de mejoría hacia la recuperación. El caso 4, aceleración del descenso, es el que mayor área cubre de casi 2060 Km², ocurriendo en su mayor parte al norte de la Cuenca Independencia. El área que cubre el caso 4 nos indica que en la mayor parte de la cuenca se está acelerando el descenso del nivel freático, lo cual implica un aumento del volumen de extracción de agua subterránea o sobreexplotación en dichas partes del acuífero.

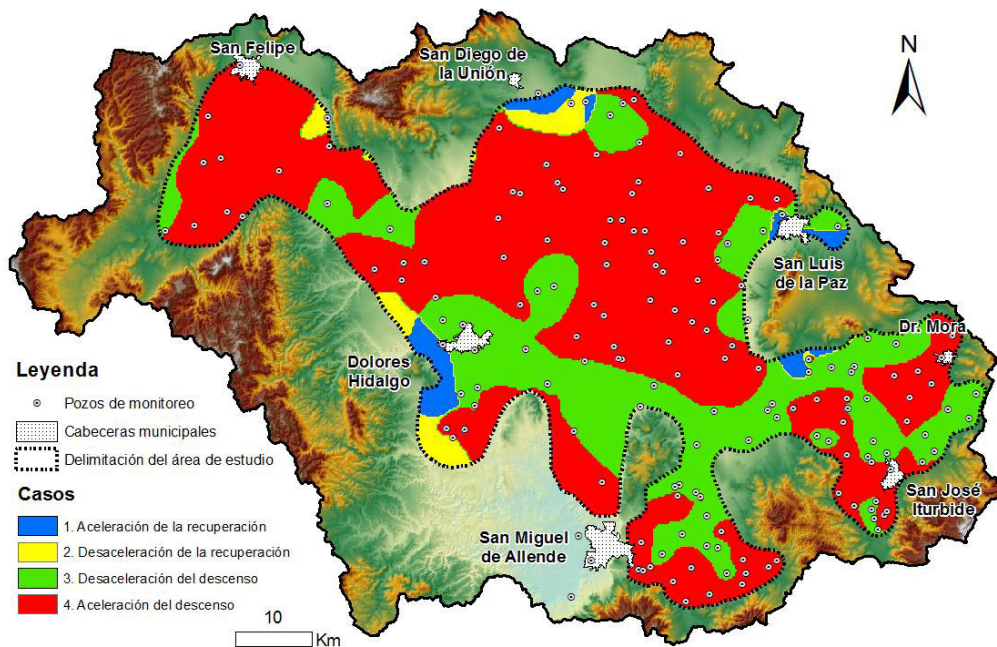


Figura 47. Implicaciones de la clasificación de la velocidad y aceleración del descenso del año 2008 al 2017.

Tabla 23. Resultados de estadísticas zonales para clasificación de casos.

| Caso | Velocidad promedio | Aceleración promedio | Área (Km ²) |
|------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 1 | 0.406 | 0.325 | 98.19 |
| 2 | 0.0262 | -0.197 | 91.44 |
| 3 | -1.117 | 0.299 | 980.73 |
| 4 | -0.968 | -0.348 | 2059.11 |

El área de mayor interés del presente estudio es el caso 4 (área de color rojo) que se observa en la Figura 47. En las áreas que se identifican con el caso 4 se aplica la hipótesis de que, en estas áreas se está extrayendo probablemente volúmenes agua subterránea de forma ilegal, ya sea por medio de pozos ilegales, o superando el volumen concesionado, así como la posibilidad de que se deba a cambios en las propiedades hidrodinámicas del acuífero.

IV.8 BALANCES DE AGUA SUBTERRÁNEA

El análisis de los balances de agua subterránea se realizó para cada zona administrativa que la CONAGUA reconoce como acuíferos. Los datos obtenidos se analizaron en periodos con intervalos de 1 año. Además, se evaluó la incertidumbre promedio de los balances realizados.

El balance de agua subterránea de cada año fue comparado con los valores de balance (disponibilidad) publicados por COANGUA en el Diario Oficial de la Federación (DOF) para relacionar ambas evaluaciones.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del balance de agua subterránea evaluado por acuífero.

IV.8.1 Acuífero Laguna Seca (LS)

La Tabla 24 muestra que en el acuífero LS el balance estuvo en déficit en todos los periodos analizados, donde los periodos 2011-2012 y 2016-2017 son los que cuentan con el mayor déficit. En comparación con las evaluaciones de CONAGUA la evaluación hecha por el presente estudio se encuentra por debajo del volumen calculado por dicha institución. No obstante, se debe considerar que la variabilidad climática, no tenida en cuenta por CONAGUA en las evaluaciones que presenta, así como el coeficiente de almacenamiento utilizado, pueden explicar gran parte de estas diferencias, además del error del propio método geoestadístico.

Tabla 24. Resumen del análisis de balance de agua subterránea del acuífero LS.

| Periodo | Velocidad de descenso (m/año) | Aceleración de descenso (m/año ²) | Balace de agua subterránea (Mm ³ /año) | Error ± (m) | Error ± Mm ³ | Disponibilidad CONAGUA Mm ³ |
|------------------------------------|-------------------------------|---|---|-------------|-------------------------|--|
| 2008-2009 | -1.726 | - | -65.199 | 0.025 | 0.944 | - |
| 2009-2010 | -0.385 | 1.340 | -14.555 | 0.120 | 4.534 | - |
| 2010-2011 | -0.171 | 0.214 | -6.461 | 0.175 | 6.612 | - |
| 2011-2012 | -2.631 | -2.460 | -99.392 | 0.117 | 4.402 | - |
| 2012-2013 | -0.217 | 2.414 | -8.197 | 0.766 | 28.956 | -26.057 |
| 2013-2014 | -0.038 | 0.179 | -1.439 | 0.374 | 14.134 | -25.350 |
| 2014-2015 | -1.684 | -1.646 | -63.634 | 0.161 | 6.098 | - |
| 2015-2016 | -0.091 | 1.594 | -3.421 | 0.153 | 5.766 | -31.167 |
| 2016-2017 | -2.521 | -2.431 | -95.255 | 0.217 | 8206 | - |
| Área | | | 755.64 Km ² | | | |
| Coeficiente de almacenamiento (Sy) | | | 0.05 | | | |

La Figura 48 muestra la evolución del balance de agua subterránea comparada con la evolución evaluada por CONAGUA (círculos de color rojo). Se puede observar que los valores del balance de agua subterránea tiene periodos de recuperación y seguidos por periodos de aumento en el déficit.

Este análisis de la evolución del balance de agua subterránea muestra que LS ha estado sometido a sobreexplotación. Si bien siempre se encuentra en déficit no parece tener una tendencia a aumentar el volumen de extracción, pero esto es relativo ya que depende del aumento de aprovechamientos de agua subterránea o concesiones que se realicen en un futuro.

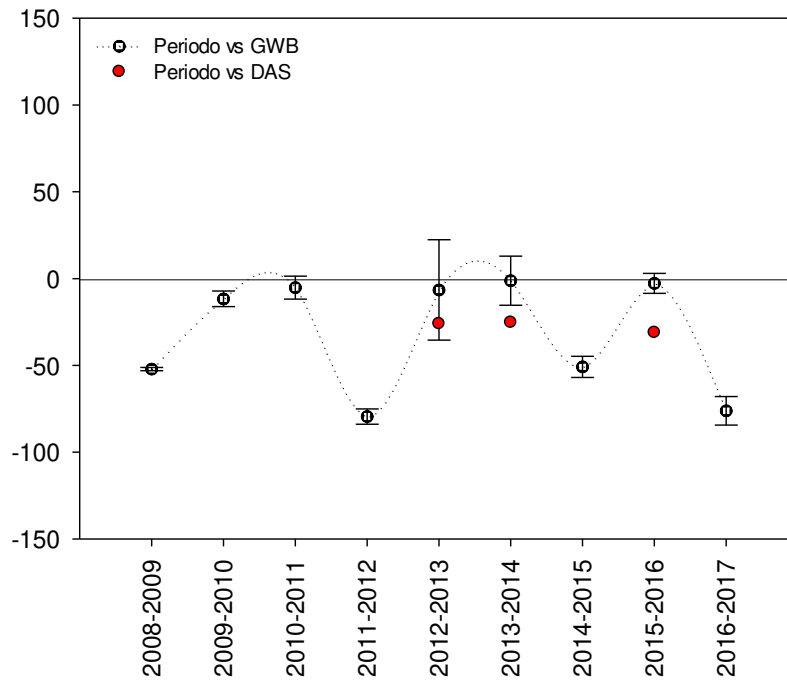


Figura 48. Evolución del balance de agua subterránea para el periodo 2008-2017 del acuífero CARL. Los puntos negros son los datos calculados y en rojo la disponibilidad de CONAGUA. El gráfico muestra el grado de incertidumbre del balance realizado

IV.8.2 Doctor Mora – San José Iturbide (DMSJ)

El acuífero de DMSJ se ha presentado en déficit por lo que indica que el acuífero se encuentra sin disponibilidad para nuevas concesiones según CONAGUA. Sin embargo, se observa que tiene una tendencia general a aumentar el déficit, aunque en algunos años se observa disminución del déficit.

Los resultados obtenidos del balance comparándose con los volúmenes presentados por CONAGUA en los mismos periodos, cuentan con mayor similitud.

Tabla 25. Resumen del análisis del balance de agua subterránea del acuífero DMSJ.

| Periodo | Velocidad de descenso (m/año) | Aceleración de descenso (m/año ²) | Balace de agua subterránea (Mm ³ /año) | Error ± (m) | Error ± Mm ³ | Disponibilidad CONAGUA Mm ³ |
|--|-------------------------------|---|---|-------------|-------------------------|--|
| 2008-2009 | -1.306 | - | -16.950 | 0.168 | 2.179 | - |
| 2009-2010 | -0.709 | 0.597 | -9.203 | 0.351 | 4.553 | - |
| 2010-2011 | -2.040 | -1.331 | -26.478 | 0.249 | 3.233 | -12.626 |
| 2011-2012 | -1.217 | 0.823 | -15.799 | 0.038 | 0.489 | - |
| 2012-2013 | -1.737 | -0.520 | -22.546 | 0.832 | 10.795 | -21.907 |
| 2013-2014 | -1.759 | -0.021 | -22.824 | 0.582 | 7.558 | -23.180 |
| 2014-2015 | -1.567 | 0.192 | -20.334 | 0.010 | 0.128 | - |
| 2015-2016 | -2.024 | -0.457 | -26.269 | 0.306 | 3.973 | -23.358 |
| 2016-2017 | -1.506 | 0.518 | -19.552 | 1.022 | 13.258 | - |
| Área | | | 432.63 Km ² | | | |
| Coficiente de almacenamiento (Sy) | | | 0.03 | | | |

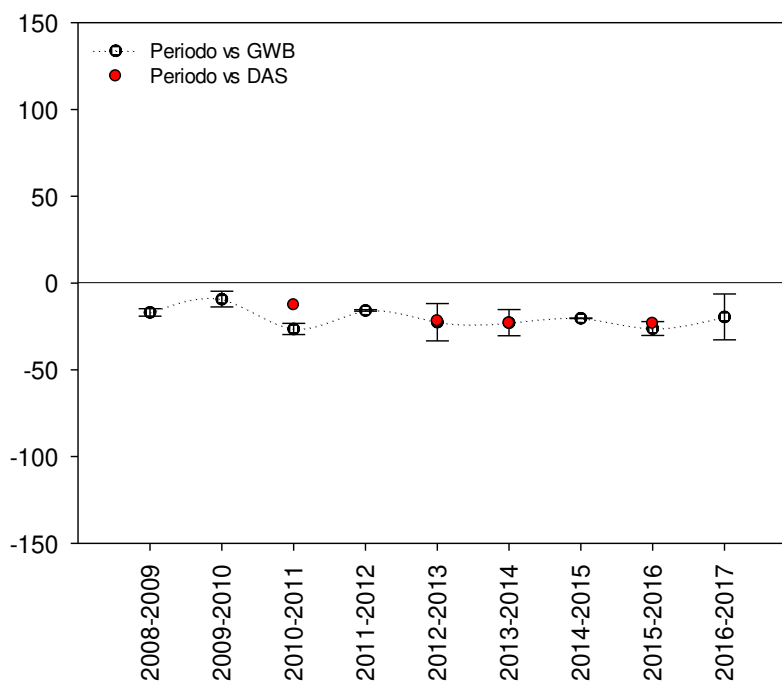


Figura 49. Evolución del balance de agua subterránea del acuífero DMSJ para los periodos 2008-2017.

Este acuífero presenta algunos periodos donde la incertidumbre del balance de agua subterránea es importante, específicamente para los periodos 2012-2013, 2013-2014 y 2016-2017.

IV.8.3 San Miguel de Allende (SMA)

Los resultados del balance en SMA tienen similitud con los presentados por CONAGUA pero con diferencias en el valor del déficit de hasta dos veces.

La evaluación del balance muestra que el acuífero San Miguel de Allende está en déficit en todos los periodos evaluados. El periodo 2016-2017 obtuvo el mayor déficit, pero no se observa que exista una tendencia de incremento de este.

Tabla 26. Resumen del análisis de balance de agua subterránea del acuífero SMA.

| Periodo | Velocidad de descensos (m/año) | Aceleración de descenso (m/año ²) | Balace de agua subterránea (Mm ³ /año) | Error ± (m) | Error ± Mm ³ | Disponibilidad CONAGUA Mm ³ |
|--|--------------------------------|---|---|-------------|-------------------------|--|
| 2008-2009 | -1.633 | - | -13.900 | 0.168 | 0.761 | - |
| 2009-2010 | -1.419 | 0.214 | -12.929 | 0.351 | 1.589 | -6.781 |
| 2010-2011 | -1.586 | -0.167 | -13.685 | 0.249 | 1.129 | - |
| 2011-2012 | -2.229 | -0.643 | -16.597 | 0.038 | 0.171 | - |
| 2012-2013 | 0.483 | 2.711 | -4.313 | 0.832 | 3.768 | - |
| 2013-2014 | -2.236 | -2.719 | -16.630 | 0.582 | 2.638 | -8.470 |
| 2014-2015 | -0.234 | 2.001 | -7.562 | 0.010 | 0.045 | -8.529 |
| 2015-2016 | -1.403 | -1.168 | -12.855 | 0.306 | 1.387 | -9.985 |
| 2016-2017 | -3.061 | -1.659 | -20.370 | 1.022 | 4.628 | - |
| Área | | | 226.53 Km ² | | | |
| Coefficiente de almacenamiento (Sy) | | | 0.02 | | | |

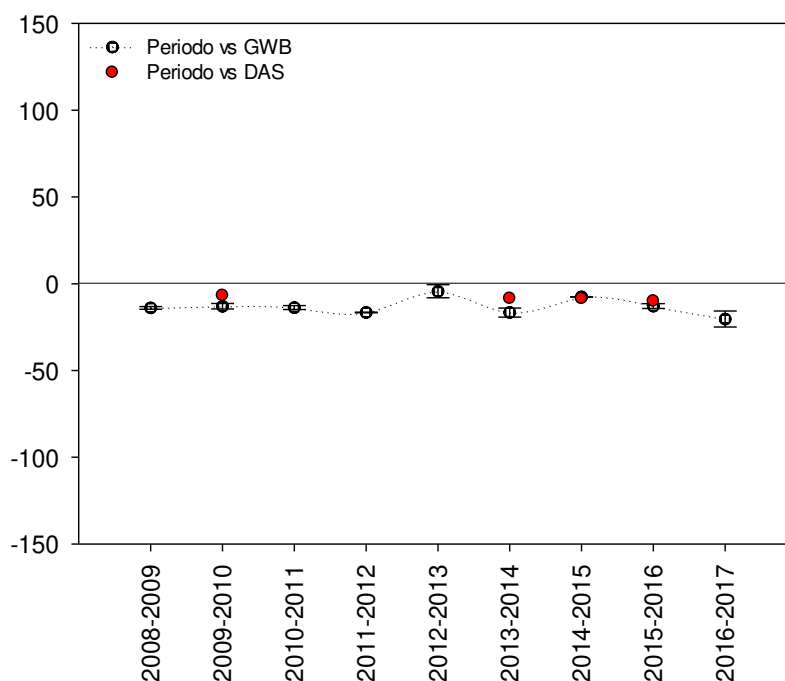


Figura 50. Evolución del balance de agua subterránea del acuífero SMA para los periodos 2008-2017.

El valor del balance de agua subterránea en la Figura 50 se comportó de forma estable los cuatro primeros periodos, después muestra cierta variabilidad.

La mayor incertidumbre en la evaluación del balance de agua se obtuvo en los periodos 2010-2013, 2013-2014 y 2016-2017.

IV.8.4 Acuífero Cuenca Alta del Río Laja (CARL)

El acuífero CARL cuenta con datos muy consistentes del balance de agua subterránea con los reportados por CONAGUA, por lo cual estos datos son representativos para el acuífero CARL.

La mayor parte de los periodos se encuentran en déficit (Tabla 27. Resumen del análisis del balance de agua subterránea del acuífero CARL. Tabla 27 y Figura 51), solamente el periodo 2014-2015 se observó una gran recuperación donde el acuífero tuvo un balance positivo.

Tabla 27. Resumen del análisis del balance de agua subterránea del acuífero CARL.

| Periodo | Velocidad de descenso (m/año) | Aceleración de descenso (m/año ²) | Balace de agua subterránea (Mm ³ /año) | Error ± (m) | Error ± Mm ³ | Disponibilidad CONAGUA Mm ³ |
|--|-------------------------------|---|---|-------------|-------------------------|--|
| 2008-2009 | -0.199 | - | -13.752 | 0.004 | 0.249 | - |
| 2009-2010 | -1.100 | -0.901 | -75.930 | 0.046 | 3.176 | - |
| 2010-2011 | -0.212 | 0.888 | -14.630 | 0.005 | 0.331 | - |
| 2011-2012 | -1.767 | -1.556 | -122.029 | 0.146 | 10.073 | - |
| 2012-2013 | -0.605 | 1.163 | -41.762 | 0.240 | 16.563 | -60.239 |
| 2013-2014 | -0.978 | -0.374 | -67.553 | 0.266 | 18.358 | -59.316 |
| 2014-2015 | 1.336 | 2.314 | 92.239 | 0.099 | 6.828 | - |
| 2015-2016 | -0.864 | -2.200 | -59.680 | 0.210 | 14.499 | -62.113 |
| 2016-2017 | -1.519 | -0.655 | -104.891 | 0.008 | 0.552 | - |
| Área | | | 1726.02 Km ² | | | |
| Coficiente de almacenamiento (Sy) | | | 0.04 | | | |

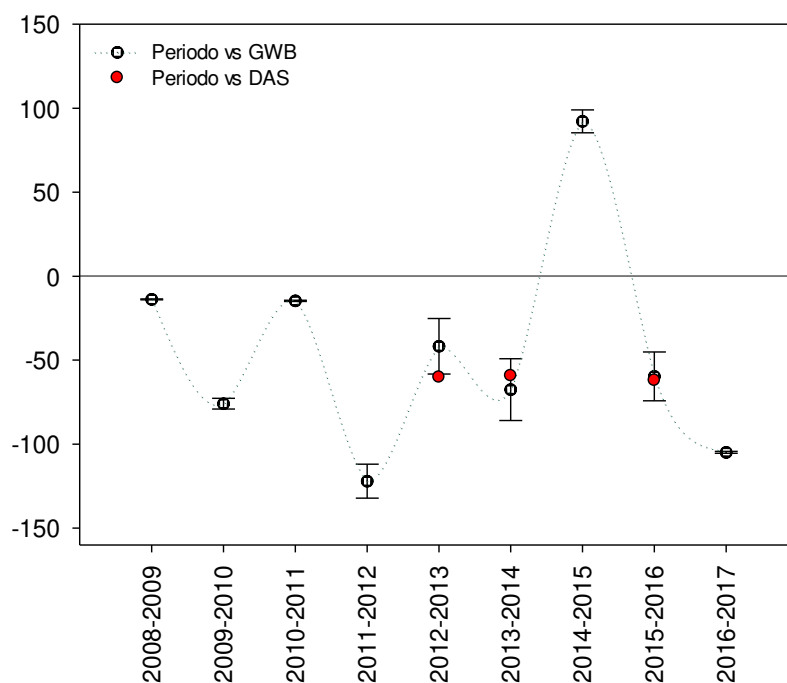


Figura 51. Evolución del balance de agua subterránea del acuífero CARL para los periodos 2008-2017.

IV.8.5 Resumen del balance de agua subterránea en el acuífero Independencia

La Tabla 28 muestra el volumen promedio del balance de agua subterránea e incertidumbre que se evaluó en la presente investigación en el periodo del 2008 al 2017.

Tabla 28. Resumen del valor promedio del balance de agua subterránea por acuífero.

| Acuífero | LS | DMSJ | SMA | CARL |
|--|---------|---------|---------|---------|
| Área Km ² | 755.64 | 432.63 | 226.53 | 1726.02 |
| Sy | 0.05 | 0.035 | 0.02 | 0.04 |
| Velocidad de descenso (m/año) | -1.05 | -1.54 | -1.48 | -0.66 |
| Aceleración de descenso (m/año ²) | -0.10 | -0.03 | -0.18 | -0.17 |
| Balance de agua subterránea (Mm ³ /año) | -39.728 | -19.995 | -13.205 | -45.332 |
| Error ± Mm ³ | 8.850 | 5.130 | 1.791 | 7.848 |
| Precipitación media (mm/año) | 520.40 | 413.61 | 553.81 | 590.82 |

IV.8.6 Comparación del volumen del balance hídrico con el índice del niño y la niña.

En este apartado se comparan el volumen del balance de agua subterránea con el Índice de Oscilación del Pacífico Norte América (PNA) para la temporada de secas. El PNA establece que cuando su valor es mayor a 0.5 se presenta el periodo de El Niño, que para la Cuenca Independencia implica un aumento en las precipitaciones observándose hasta la estación de invierno. Cuando El PNA es menor que -0.5 se considera como el periodo de La Niña, donde el periodo sequía se prolonga durante el periodo de lluvias. La Tabla 29 muestra los valores del balance GWB de cada acuífero y los valores del PNA para cada periodo evaluado.

Tabla 29. Resumen del balance de agua subterránea para cada acuífero y el Índice de Oscilación del Pacífico Norte América.

| Periodo | PNA | GWB Mm ³ /año | | | |
|-----------|--------|--------------------------|---------|---------|----------|
| | | LS | DMSJ | SMA | CARL |
| 2008-2009 | 0.565 | -65.199 | -19.776 | -13.900 | -13.752 |
| 2009-2010 | -0.413 | -14.555 | -10.737 | -12.929 | -75.930 |
| 2010-2011 | 0.053 | -6.461 | -30.891 | -13.685 | -14.630 |
| 2011-2012 | -0.676 | -99.392 | -18.432 | -16.597 | -122.029 |
| 2012-2013 | -0.573 | -8.197 | -26.304 | -4.313 | -41.762 |
| 2013-2014 | 0.228 | -1.439 | -26.628 | -16.630 | -67.553 |
| 2014-2015 | 0.771 | -63.634 | -23.723 | -7.562 | 92.239 |
| 2015-2016 | 0.238 | -3.421 | -30.647 | -12.855 | -59.680 |
| 2016-2017 | -0.858 | -95.255 | -22.810 | -20.370 | -104.891 |

La Figura 52 muestra la correlación del balance de agua en la Cuenca Alta del Río Laja (CARL) con el PNA. Este grafico muestra que los valores negativos del PNA, que comprenden el periodo de La Niña, está relacionado con un incremento del déficit, valores máximos negativos del balance, lo que asocia los eventos de sequía a una mayor extracción de agua subterránea. Mientras tanto, para valores positivos del PNA, que comprende el periodo de El Niño, está relacionado con una disminución del déficit e incluso llegando a valores de recuperación, valores mínimos negativos e incluso valores positivos del balance. Este comportamiento muestra que en periodos de La Niña el déficit se intensifica por condiciones de sequía, mientras que para eventos de El Niño el déficit disminuye incluso hasta valores positivos (recuperación).

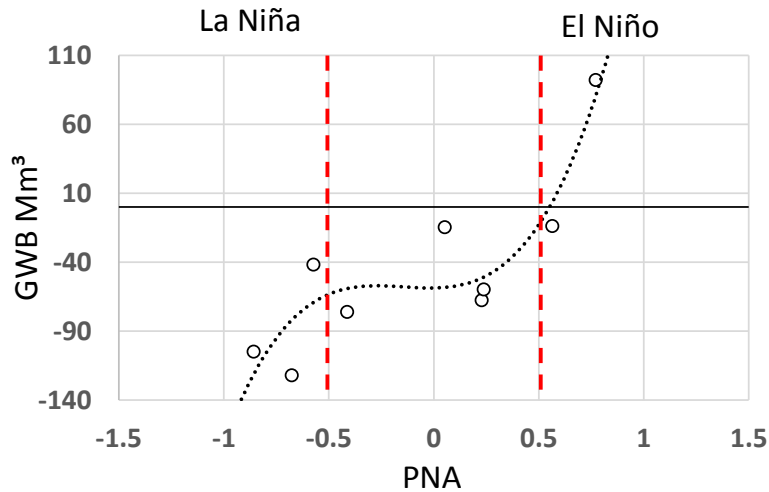


Figura 52. Comparación del balance de agua subterránea con el índice de Oscilación del Pacífico Norte América en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja.

La correlación entre el balance y el PNA para los acuíferos San Miguel de Allende (SMA) y Dr. Mora – San José Iturbide (Figura 53 y Figura 54), muestra que tienen compartimientos diferentes al observado en CARL. Esto implica que, el volumen del balance tiene una menor respuesta en relación con los fenómenos climáticos de El Niño y La Niña.

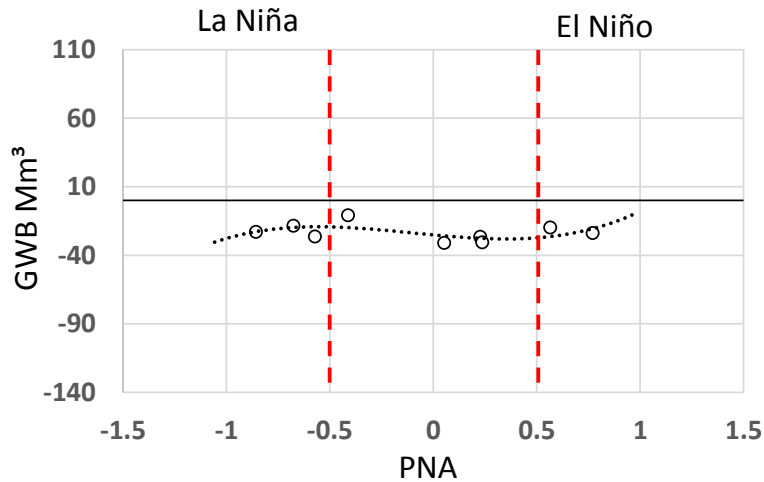


Figura 53. Comparación del balance de agua subterránea con el Índice de Oscilación del Pacífico Norte América en el acuífero San Miguel de Allende.

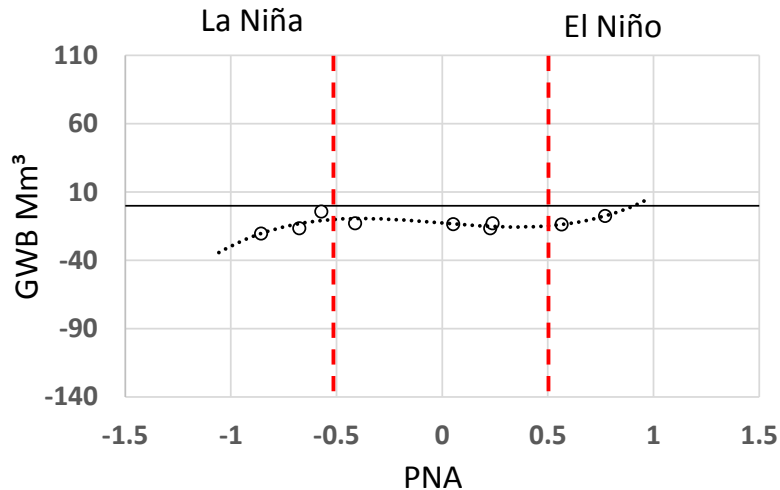


Figura 54. Comparación del balance de agua subterránea con el Índice de Oscilación del Patrón Pacífico Norte América en el acuífero Dr. Mora - San José Iturbide.

La Figura 55 describe la correlación del balance de agua subterránea con el PNA en el acuífero Laguna Seca (LS). En LS ocurre un incremento de déficit en ambos eventos climáticos de El Niño y La Niña, este comportamiento parece inusual pues implica que ambos fenómenos climáticos al parecer impactan de forma negativa (sequía) en LS. Esto debe estudiarse más a fondo para esclarecer este comportamiento.

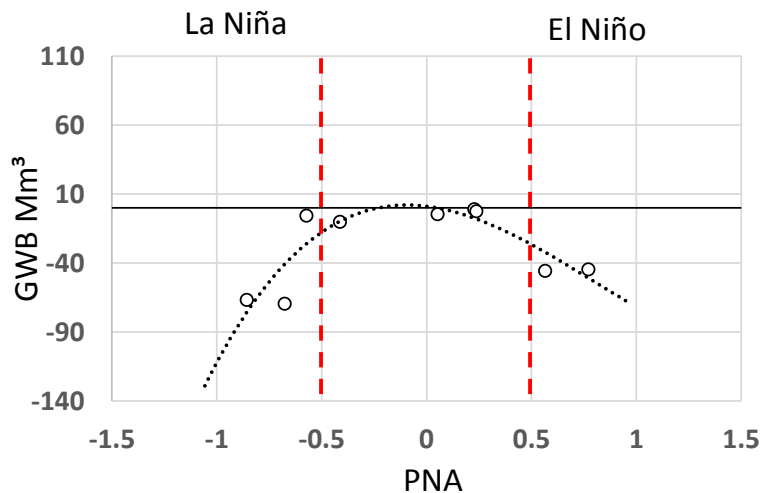


Figura 55. Comparación del balance de agua subterránea con el Índice de Oscilación del Pacífico Norte América en el acuífero Laguna Seca.

IV.9 EVOLUCIÓN FUTURA DEL NIVEL FREÁTICO

Mediante el método de extrapolación de tendencia con la herramienta Curve Fit del USGS, se obtuvieron extrapolaciones de las variables del tiempo (X) y el nivel freático (Y) en formato raster. Con estas variables se generaron mapas de predicciones futuras del efecto en el nivel freático mediante la utilización de la herramienta “Calculadora de Raster”. La Figura 56 muestra la posición futura del nivel freático en diferentes periodos. La escala de

la profundidad de la capa freática es igual a la escala de los mapas de predicción del apartado IV.4.4, esto para visualizar el cambio con respecto a los años evaluados en la presente investigación.

Los mapas mostrados de la evolución futura del nivel freático, en la Figura 56, suponen que la tendencia del nivel freático del periodo 2008-2017 se mantiene constante en la Cuenca Independencia (modelo lineal). Con esta tendencia de extracción del agua subterránea la predicción futura de los descensos muestra que será más grave en la parte central del Acuífero Independencia, afectando principalmente los municipios de Dolores Hidalgo y San Luis de la Paz.

El acuífero SMA, muestra también problemas de descensos en su nivel freático si en un futuro continua la tendencia actual.

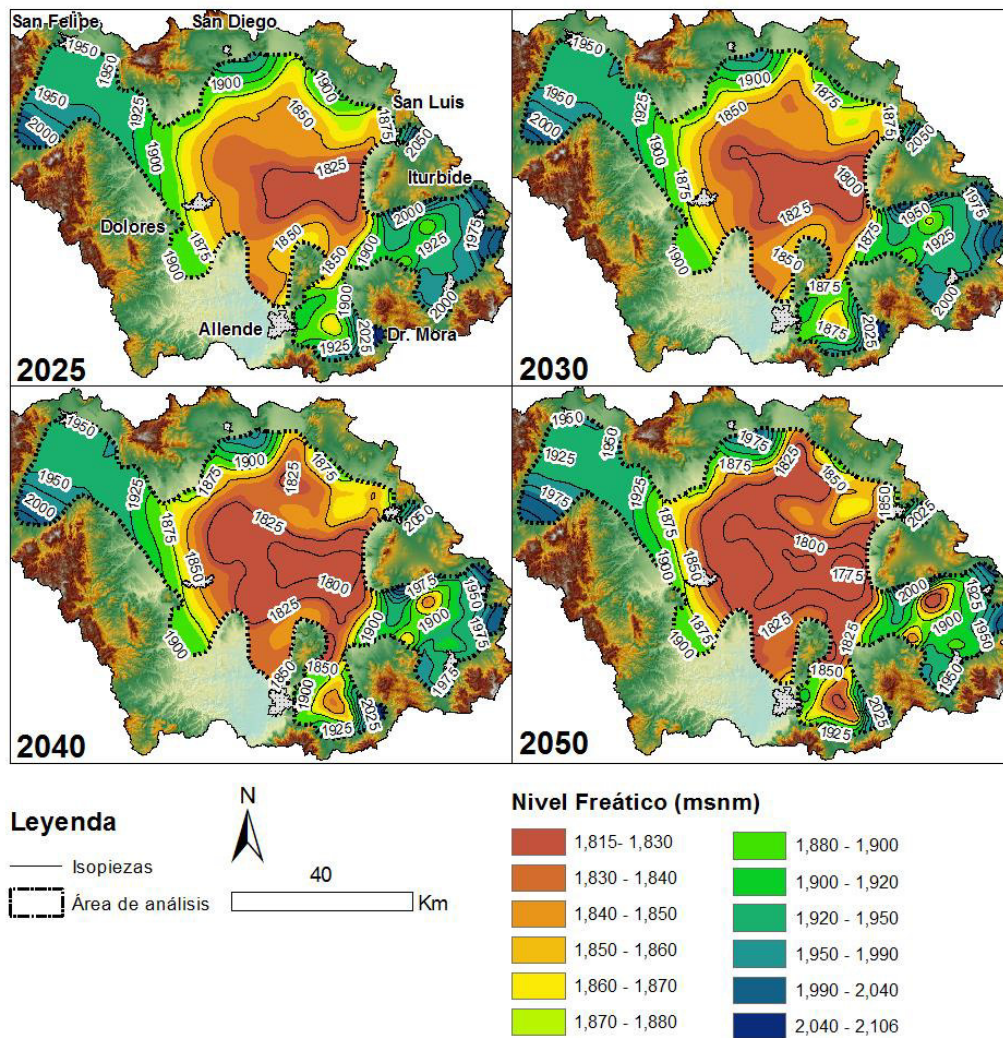


Figura 56. Mapa de evolución futura del nivel freático para distintos años.

IV.9.1 Coeficiente de Determinación

La Figura 57 es la representación del grado del R^2 de la predicción futura del nivel freático en la Cuenca Independencia. Se observa que las zonas con mayor ajuste se encuentran al

centro de la cuenca o áreas centrales de los acuíferos. Estas zonas que tienen mayor certeza en la predicción son donde se presentan los mayores cambios del nivel freático o donde se presentan los mayores descensos vistos en los mapas de velocidad de descenso del capítulo IV.5. Las zonas con menor relación del R^2 , se presentan principalmente en áreas donde hay poca información o donde la variación del nivel freático no tiene una tendencia lineal (no se ajustan a un modelo lineal), estas zonas se ubican en zonas próximas a zonas de montaña como en la cabecera municipal de San Luis, y un área entre los municipios de Dolores y San Felipe.

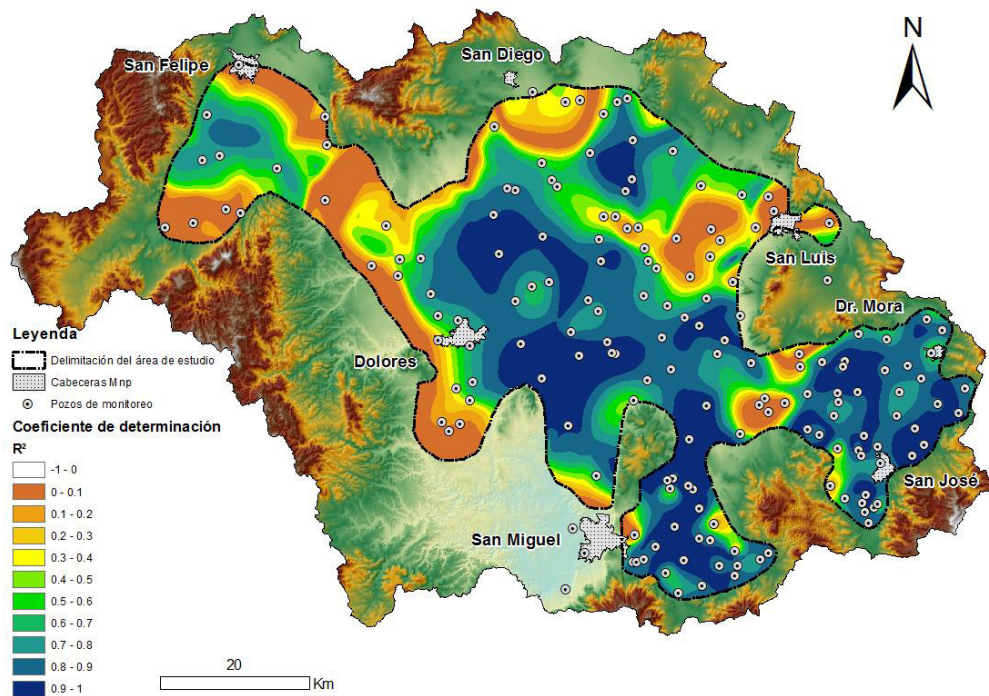


Figura 57. Mapa coeficiente de determinación.

IV.10 HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DEL BALANCE DE AGUA SUBTERRÁNEA

Mediante el lenguaje de programación Python se programó una herramienta para la automatización y cálculo del balance de agua subterránea para ArcGIS. La herramienta se encuentra conectada a la caja de herramientas (ToolBox) de ArcGIS la cual funciona de misma manera de que una herramienta de este programa, con una ventana donde podemos introducir los datos a trabajar y una introducción de la dirección de los datos de salida, Figura 58.

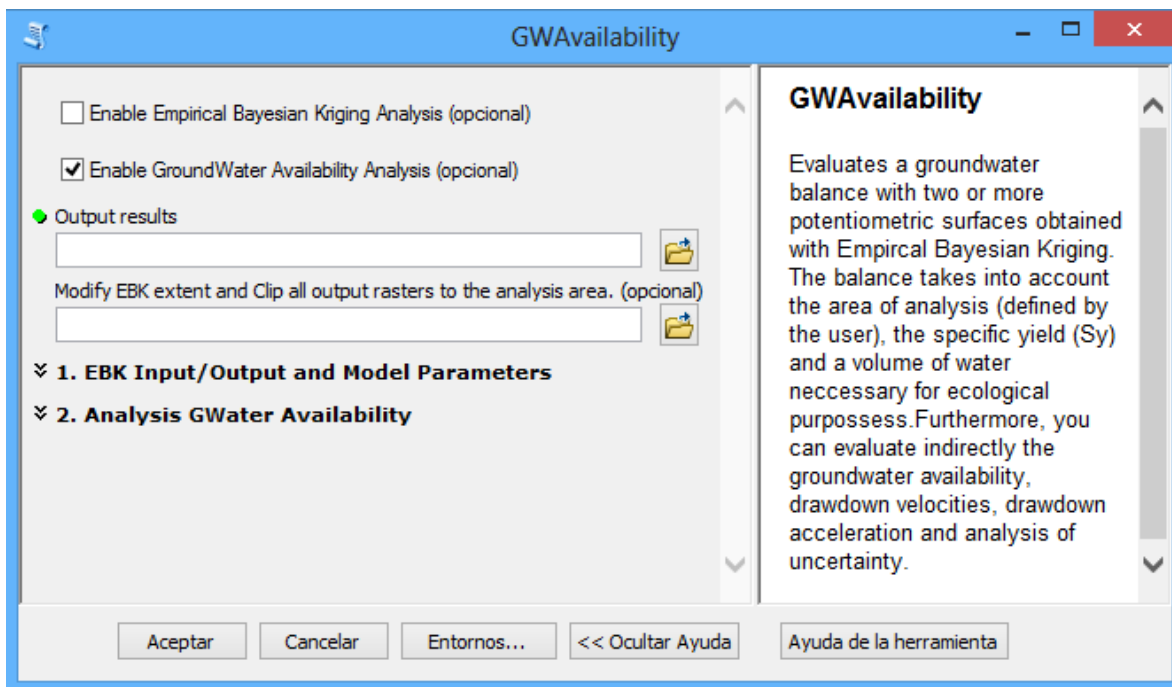
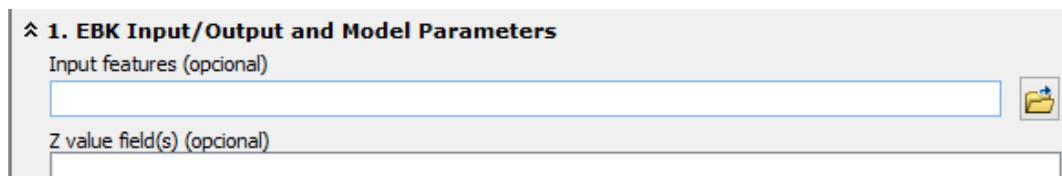


Figura 58. Ventana de la herramienta GWAvailability.

La ventana cuenta con la activación de los procesos a realizar a partir de datos del nivel freático medidos en pozos. “Enable Empirical Bayesian Kriging Analysis” es para generar modelos de predicción del nivel freático. “Enable GroundWater Analysis” determina el balance de aguas subterránea a partir de la generación de mapas de velocidad del nivel freático, el área de análisis y el coeficiente de almacenamiento (S_y). Además, genera mapas de aceleración del descenso del agua subterránea. Cuenta con la opción “Modify extended and Clip all raster to the analysis area” para introducir la extensión del área de análisis a evaluar en este caso el área resultante del apartado IV.4.1. Del lado derecho de la ventana cuenta con un cuadro de información para el uso de la herramienta.

Al seleccionar cualquiera de estas dos opciones la herramienta habilitará el uso de los apartados para el proceso que se necesite usar. Estos apartados son los siguientes:

1. “Enable Empirical Bayesian Kriging Analysis” Habilitar el análisis EBK.



Input features: selecciona la carpeta o geodatabase para definir el espacio de trabajo.

Z value fiel(s): Selecciona todas las columnas donde desea realizar un análisis de EBK en el proceso por lotes.

Export EBK results to raster file: Exporta los resultados de predicción del EBK para utilizar la segunda parte de esta herramienta.

La siguiente figura muestra el apartado para introducir los parámetros geostatísticos para modelar la superficie del nivel freático.

The screenshot shows the following settings in the tool's interface:

- Cell size (opcional): 300
- Data transformation type (opcional): EMPIRICAL
- Semivariogram model type (opcional): EXPONENTIAL
- Maximum number of points in each local model (opcional): 20 (slider range 20 to 500)
- Local model overlap factor (opcional): 1
- Number of simulated semivariograms (opcional): 100 (slider range 30 to 10000)
- Search neighborhood (opcional): Standard
- Search Neighborhood Settings:
 - Major semiaxis: (empty)
 - Minor semiaxis: (empty)
 - Angle: 0
 - Maximum neighbors: 15
 - Minimum neighbors: 10
 - Sector type: 1 Sector
- Output Surface Type (opcional): PREDICTION

2. Enable GroundWater Analysis

The screenshot shows the following settings in the tool's interface:

- 2. Analysis GWater Availability**
- Select Raster Type (opcional): PREDICTION
- Input Rasters (opcional): (empty field with folder icon)

Select Raster Type. Selecciona el tipo de ráster de salida, modelo de errores o con el método de EBK.

Input Raster. Selecciona el ráster según la opción de tipo de ráster (predicción o error).

Este apartado es para habilitar el procesamiento de las evoluciones que se indican.

- Evaluate Drawdown Velocities [dh/dt] (opcional)
- Evaluate Drawdown Acceleration [dh/dt²] (opcional)
- Evaluate GW Availability [A * Sy * average(dh/dt) - NDC] (opcional)

Las opciones son para introducir los parámetros geohidrológicos del acuífero que se evalúa.

| | |
|---|------|
| Time increment of input rasters (opcional) | 1 |
| Aquifer Specific Yield [Sy]: (opcional) | 0.05 |
| Natural Discharge Compromised [cubic meters] (opcional) | 0 |

CAPITULO V: DISCUSIÓN

V.1.1 Datos recuperados

La recuperación de datos faltantes, o huecos de información, es un proceso importante para completar, en la medida de lo posible, la información que es utilizada para generar los semi-variogramas que el modelo geoestadístico requiere para hacer predicciones. El proceso de recuperación de datos que se siguió en esta tesis es un proceso manual y visual, pero sería recomendable trabajar en un proceso automatizado para este proceso. Si bien la recuperación de datos puede obtenerse valores de los niveles freáticos para poder tener una mayor cantidad de información para formar modelos de superficie, estos datos recuperados son sólo un valor próximo al posible valor real, puesto que se utiliza la tendencia de los datos de lluvias y secas y promediando valores de pozos cercanos.

Otro aspecto relevante de este proceso de recuperación de datos es la detección de lecturas atípicas, estas lecturas atípicas implican distintas posibilidades como: la lectura se realizó para un nivel dinámico (no se apagó la bomba con la antelación debida), error humano al leer la profundidad en la sonda, entre otros posibles errores.

V.1.2 Estadística descriptiva de los datos

La estadística descripta se utilizó para determinar si la distribución de los datos del nivel freático se comporta como una distribución normal o Gaussiana, necesaria para determinar qué tipo de modelo geoestadístico es el más conveniente. Los resultados de la estadística descriptiva del presente análisis muestran que, la serie de datos no se comportan como una distribución normal, las gráficas de la distribución de los datos no cumplen el supuesto de estacionariedad, sus histogramas no siguen la forma de campana de gauss y la prueba de normalidad Kolmogorov – Smirnov no acepta la hipótesis de similitud con una distribución normal. Esto implica la necesidad de utilizar un método geoestadístico que pueda trabajar con datos que no siguen una distribución normal y no son estacionarios como el Empirical Bayesian Kriging.

V.1.3 Calibración del modelo geoestadístico EBK

El modelo seleccionado con ID **LE-KB-390** obtuvo el mejor ajuste según las reglas de una buena validación cruzada y análisis de errores presentados en la Tabla 6, pudiendo el modelo generar predicciones para los demás años que se evalúan en el estudio. La prueba de normalidad Kolmogorov - Smirnov (K-S (P)) de los errores de distribución muestra que de los años 2008, 2010, 2011 y 2012 el grado de confianza es muy bajo, y los años 2009, 2013, 2014, 2015, 2016 y 2017 son aceptables. Revisando los Gráficos Q-Q normales de errores estandarizados de la Figura 25 se verifica que la mayor parte de los valores se encuentran dentro de un rango de confianza (líneas de predicción del 95% de confianza), los que se encuentran fuera son pozos localizados en el acuífero fracturado o zona de montaña, siendo en su mayor parte pozos de montaña de CARL.

Se verificó que se puede obtener un buen ajuste del modelo, según los criterios de la validación cruzada de la Tabla 6, considerando toda la red de pozos de monitoreo que incluye los cuatro acuíferos. Se intentó la calibración de forma individual para cada acuífero, aunque con un mayor error de ajuste. Por lo anterior, se decidió trabajar con un único modelo geoestadístico que utiliza todos los pozos de la red de monitoreo.

V.1.4 Área de análisis

Se delimitó un área de análisis tomando en cuenta los errores de predicción estandarizados, la geología y los límites administrativos de los acuíferos para hacer una delimitación manual de este contorno. Si bien esta metodología no tiene un procedimiento o reglas específicas, ya que se debe tomar la decisión de qué valor de error estandarizado y que elementos de la geología se van a utilizar para el trazado. Esta forma de delimitar el área de análisis permite reducir el error de predicción del modelo geoestadístico, al descartar las zonas con mayor error de predicción, y obtener un área donde se tiene mayor certeza del nivel freático.

V.1.5 Velocidad y aceleración del nivel freático

Los mapas de velocidad y de aceleración, ayudan a determinar en qué periodos y zonas se encuentran los mayores problemas por la sobreexplotación del agua subterránea en la Cuenca de Independencia. Al ser analizados por zona administrativa se pudo determinar en qué periodo y que zonas son las que están sufriendo un mayor descenso del nivel freático. Así como también, donde se encuentran las mayores aceleraciones negativas combinadas con velocidades negativas, para identificar cuáles fueron las partes más vulnerables del acuífero por la constante extracción de agua subterránea.

V.1.6 Implicaciones de la clasificación de la velocidad y aceleración

La velocidad y aceleración del nivel freático permiten clasificar cuatro casos posibles explicados en la metodología, determinando donde y como ocurren ambos descensos en todo el periodo evaluado, 2008 – 2017, verificando el área en que se extiende dichos casos. Esta clasificación muestra las zonas del acuífero donde se está recuperando o abatiendo el nivel freático (velocidad positiva o negativa) de forma acelerada o decelerada (aceleración positiva o negativa). Después de clasificar las velocidades y aceleraciones se determinó que en el acuífero predomina el caso 4 de la clasificación o una aceleración del descenso del nivel freático. El predominio del caso 4 es preocupante, ya que cubre casi el 57% de la superficie del área de análisis, debido a que en estas zonas se tienen condiciones de sobreexplotación del acuífero, lo cual se refleja en una constante disminución del nivel freático y reducción de la disponibilidad en la mayor parte de la Cuenca Independencia. Además, estas zonas se generan por las extracciones que superan la capacidad del acuífero, por lo que se pueden relacionar con pozos que extraen un volumen mayor que el volumen concesionado o pozos no registrados (ilegales). Aunque, también existe la posibilidad de que se deba a un cambio de las propiedades hidrodinámicas del acuífero. En cualquier caso, es necesario enfocar esfuerzos para un seguimiento de estas zonas.

V.1.7 Balance de agua subterránea

El balance de agua subterránea se comparó con el balance (disponibilidad) medio anual de un acuífero que publica la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el Diario Oficial de la Federación. Los resultados de la comparación muestran que la variabilidad climática genera importantes cambios en la variación de almacenamiento, ello de forma indirecta, que incluso llevan a que un acuífero pueda tener periodos de recuperación del nivel freático, o un balance de agua positivo, lo cual no se refleja en las evaluaciones que la CONAGUA reporta. Aproximar la variación de almacenamiento de agua subterránea (ΔS) mediante la variación del nivel freático es una alternativa al balance con volumen de recarga, descarga y extracciones. Sobre todo, es una alternativa viable cuando las entradas y salidas para realizar el balance tienen importantes fuentes de incertidumbre. No obstante, evaluar el ΔS con sólo la variación de niveles freáticos también tiene fuentes de incertidumbre como son los errores propios de la predicción y el coeficiente de almacenamiento específico (S_y). Sobre los errores de predicción ya se ha abordado en apartados anteriores su análisis. En lo que respecta al S_y , este parámetro cuenta con un alto grado de incertidumbre ya que no se cuenta con mucha información para establecer un valor medio y además que este valor puede variar gradualmente en diferentes zonas de la cuenca.

Una de las ventajas de evaluar el ΔS con el cambio del nivel freático, mediante un modelo geoestadístico, es que no se elimina la variabilidad provocada por distintos factores como: la variabilidad de la recarga (natural e inducida) al acuífero, la variabilidad de las extracciones de pozos legales como ilegales y la variabilidad de las propiedades hidrodinámicas del acuífero. Esto es posible dado que la variabilidad observada en la red de monitoreo es la respuesta a todos estos factores. Por lo anterior, es posible observar una relación entre la variabilidad del ΔS en los acuíferos de la Cuenca Independencia con los efectos de La Niña y El Niño, esto se debe principalmente a una influencia indirecta de la variabilidad climática a través de la precipitación que se genera al paso de los dos fenómenos. Por un lado, cuando tenemos una mayor precipitación, fenómeno de El Niño, se reducen los bombeos de agua subterránea para riego y se genera recuperación del acuífero. Caso contrario ocurre con el fenómeno de La Niña, durante este periodo se generan sequías por lo cual es necesario bombear mayores volúmenes de agua subterránea para irrigación. Esta relación indirecta se puede notar claramente en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja y, sutilmente en los acuíferos Dr. Mora – San José Iturbide y San Miguel de Allende. No obstante, el acuífero Laguna Seca muestra déficit cuando se presentan ambos fenómenos, lo cual contradice la relación inicialmente descrita para el fenómeno de El Niño, por lo cual es necesario mayores investigaciones en la relación climatología y explotación del agua subterránea en este acuífero.

Se elaboraron mapas de velocidad y aceleración promedios del nivel freático que determinaron las zonas más afectadas por la extracción del recurso hídrico para todo el periodo de análisis (2008 – 2017), mostrando que la parte más afectada es el centro de la Cuenca Independencia donde se observó los mayores descensos.

V.1.8 Evolución futura del nivel freático

La evolución futura se realizó extendiendo la tendencia de cambio de los niveles freáticos durante el periodo 2008 – 2017 (Figura 56). La tendencia lineal se ajustó de forma aceptable

para aquellas zonas donde predominan los descensos del nivel freático, no así para las zonas donde el nivel freático no tiene una tendencia clara y que está más relacionada con zonas de recarga lateral, véase la Figura 57. Pero en general, la evolución futura para aquellas zonas con un aceptable coeficiente de determinación (R^2) es relevante para tener un escenario potencial, donde es posible observar la evolución del nivel freático si se mantiene el actual nivel de sobreexplotación en la Cuenca Independencia.

CAPITULO VI: CONCLUSIONES

- El análisis exploratorio de los niveles observados en la red de pozos de monitoreo muestra que la serie de datos no siguen una distribución normal y es no estacionaria espacialmente, por esto el mejor método para modelar los datos del nivel freático es el Empírico Bayesiano Kriging (EBK), debido a su potencial de trabajar datos que no cumplen con estas dos condiciones.
- Del análisis exploratorio se identificó posibles datos atípicos, de los cuales resultó que los niveles registrados en el pozo CARL-6 no guardan relación con los niveles registrados en los pozos cercanos a este. Este pozo deberá ser analizado posteriormente para entender el motivo para que los niveles registrados en este no guarden correlación espacial con los pozos circundantes.
- Se obtuvo un modelado por EBK de nivel freático mediante validación cruzada y análisis de errores, que fuera lo más representativo posible a modelos conceptuales como la topografía, geología y modelos del nivel anteriormente elaborados para determinar la evolución del acuífero y su balance de agua subterránea, donde prevaleció la configuración de parámetros del modelo nombrado LE-KB-390.
- Las predicciones generadas con el modelo geoestadístico no muestran sesgos importantes que imposibiliten su implementación para este estudio. Se analizó para todos los años los gráficos “Q-Qplot” y “Valores Predichos vs Valores Medidos”, los cuales visualmente tienen una pendiente cercana a 1 para cada periodo, como la prueba de normalidad en los errores de predicción, donde en la mayoría de los años la prueba de normalidad define que los errores siguen una distribución normal ($p > 0.05$).
- Se identificó que el área de predicción con el menor rango error estandarizado, esta es el valle de la cuenca donde los materiales forman un acuífero permeable y donde se encuentran la mayor parte de los aprovechamientos de agua subterránea. Los errores de predicción obtenidos se mantuvieron mayormente dentro los 12 a 13 m para cada periodo, por lo cual da más validez del modelo como su rango de extensión a predecir.
- Los datos en conjunto (datos de 5 acuíferos) tuvieron suficiente correlación espacial por lo que fueron modelados conjuntamente. Se probó la modelación de los acuíferos por separado, cada zona administrativa (acuíferos) por separado, aunque se obtuvo un mayor error de predicción.
- La modelación muestra que las principales zonas de recarga se encuentran al norte y este de la cuenca y la salida es por la Presa de Allende. Las cotas equipotenciales

van desde los 2040, en sierra de Lobos, sierra el Zamorano y Azafrán, mientras que las cotas menores de 1840 se encuentran en el centro y la porción sur de la cuenca. Se tiene direcciones de flujo de las zonas de montaña al centro del acuífero principalmente N-S y E-O. Se distingue un **cono de abatimiento** al centro del acuífero el cual está en constante aumento de su radio de influencia.

- La metodología geoestadística es una alternativa a los balances de aguas subterráneas realizados por CONAGUA, con la ventaja de que utilizan únicamente niveles de agua de pozos de monitoreo y el coeficiente de almacenamiento específico (Sy).
- El análisis de los mapas de velocidad y aceleración permiten definir zonas donde los descensos del nivel freático se aceleran posiblemente por:
 - Pozos ilegales,
 - Pozos que superan el volumen de extracción concesionado y
 - Cambios en las propiedades hidrodinámicas del acuífero.
- Del análisis de los mapas de velocidad y aceleración se determinó aproximadamente el 57% de la superficie del área de análisis se aceleró a abatimiento del nivel freático en el periodo del 2008 al 2017, mostrando el fuerte sometimiento a la sobreexplotación del agua subterránea.
- El balance de agua subterránea obtenido de los acuíferos se ve afectado indirectamente por la variabilidad climática (índice de oscilación del Pacífico Norte), esto por efecto indirecto de las lluvias sobre la extracción de agua subterránea para riego. Es decir, durante El Niño se presentan lluvias durante el periodo de secas y reducen la necesidad de riego, mientras que el caso contrario ocurre en periodos de La Niña. Sin embargo, LS muestra una relación distinta durante el periodo de El Niño ya que no se observa recuperación y en su lugar se intensifica el déficit de agua subterránea. Este comportamiento será motivo de estudio para futuras investigaciones.
- La programación de una herramienta en Python para la automatización de los procesos de modelación y cálculo del balance de agua subterránea agilizo el tiempo de trabajo por mucho, como la organización de información generada.

CAPITULO VII: REFERENCIAS

- Adhikary PP, Dash CJ (2017) Comparison of deterministic and stochastic methods to predict spatial variation of groundwater depth *Applied Water Science* 7:339-348 doi:10.1007/s13201-014-0249-8
- Ahmadi SH, Sedghamiz A (2007) Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level *Environmental Monitoring and Assessment* 129:277-294 doi:10.1007/s10661-006-9361-z
- Barlow, P.M. (2002) Concepts for National Assessment of Water Availability and Use. Circular 1223. U.S. Geological Survey, pp. 34.
- Basu K (2016) Spatio Temporal Mapping of Tuberculosis using Log-Empirical Bayesian Kriging Methods. Technical Report vol ASU/2016/3. Indian Statistical Institute / Applied Statistics Unit
- Béjar-Pizarro M et al. (2017) Mapping groundwater level and aquifer storage variations from InSAR measurements in the Madrid aquifer, Central Spain *Journal of Hydrology* 547:678-689 doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.02.011>
- CEAG. (2018) "Pozos y agua subterránea." Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, from http://agua.guanajuato.gob.mx/disponibilidad_2.php#pozos.
- CFE (2017) Tarifa de estímulo nocturna/diurna para bombeo de agua para riego agrícola. Comisión Federal de Electricidad. http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=9N&Anio=2017&mes=10. Accessed Oct. 07 2017
- Chavez A, Pinales A, Ducoing R, Llerar G, Cruz JL (2006) Auditing and redesign of groundwater models: the Mexican experience. In: Sánchez-Vila X, Carmen-Cabrera Md, Valverde M (eds) Jornadas de la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada, Alicante, España, 2006 2005. *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, vol 21. Instituto Geológico y Minero de España, España, p 657
- Chen L, Feng Q (2013) Geostatistical analysis of temporal and spatial variations in groundwater levels and quality in the Minqin oasis, Northwest China *Environmental Earth Sciences* 70:1367-1378 doi:10.1007/s12665-013-2220-7
- CLIMATE-DATA.ORG. (2019) Clima Guanajuato. CLIMATE-DATA.ORG, from <https://es.climate-data.org/america-del-norte/mexico/guanajuato/guanajuato-3370/>.
- COCLIMA (2011) Programa Estatal de Cambio Climático Guanajuato. Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato / Gobierno del Estado, Guanajuato
- CONAGUA (2009) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108), Estado de Guanajuato. (Technical study of 30-September-2008). *Diario Oficial de la Federación* (DOF: 20-APR-2009), México
- CONAGUA (2010) Vedas de Agua Subterránea en México (Ground Water Bans in Mexico). SEMARNAT. Gobierno Federal. [ftp://ftp.conagua.gob.mx/IFAI/2016/SISI1610100091616/Documentos/Otros/\(2010\)DOC_VEDAS_SUB.pdf](ftp://ftp.conagua.gob.mx/IFAI/2016/SISI1610100091616/Documentos/Otros/(2010)DOC_VEDAS_SUB.pdf).
- CONAGUA (2012) Reporte del clima en México. Reporte anual 2012. Servicio Meteorológico Nacional / CONAGUA, México
- CONAGUA (2013) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108), Estado de Guanajuato. (Technical Study of 31-March-2013). *Diario Oficial de la Federación* (DOF: 20-12-2013), México
- CONAGUA (2015a) Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Cuenca Alta del Río Laja (1108), Estado de Guanajuato (Technical study of 30-June-2014). *Diario Oficial de la Federación* (DOF: 20-APR-2015), México
- CONAGUA (2015b) Reporte del clima en México. Reporte anual 2015. Servicio Meteorológico Nacional / CONAGUA, Mexico D.F.
- CONAGUA (2017a) Base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA). <http://app.conagua.gob.mx/Repda.aspx>. Accessed Sep-29 2017
- CONAGUA (2017b) Resúmenes Mensuales de Temperatura y Lluvia. COMISION NACIONAL DEL AGUA. <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>. Accessed 07 July 2017

- CPC. (2019) Pacific/North American (PNA). National Weather Service, from <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml>.
- Custodio E (2002) Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal* 10:254-277 doi:10.1007/s10040-002-0188-6
- De Jager NR, Fox TJ (2013) Curve Fit: a pixel-level raster regression tool for mapping spatial patterns *Methods in Ecology and Evolution* 4:789-792 doi:10.1111/2041-210X.12068
- El-Fadel M, Tomaszewicz M, Adra Y, Sadek S, Abou Najm M (2014) GIS-Based Assessment for the Development of a Groundwater Quality Index Towards Sustainable Aquifer Management *Water Resources Management* 28:3471-3487 doi:10.1007/s11269-014-0683-2
- ESRI (2016) ArcGIS Help Library: What is Empirical Bayesian Kriging? vol 10.4. ESRI, United States of America
- ESRI (2016 a) Cómo funciona Kriging. Environmental Systems Research Institute, Inc., from <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-kriging-works.htm>.
- ESRI (2019) ¿Qué es Python? Environmental Systems Research Institute, Inc., from https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/analyze/python/what-is-python-.htm?fbclid=IwAR0fvjMjbZ-0Wn149AKwLWzvOe9hkU8qk8sbW7hgaxtHrivDog_L-QMyUDU.
- Foster S, Garduño H, Kemper K (2004) The COTAS: Progress with Stakeholder Participation in Groundwater Management in Guanajuato, Mexico, 10 edn. The World Bank,
- Garfias J. (2001) ALTERNATIVAS DE GESTIÓN SUSTENTABLE DE RECURSOS HÍDRICOS EN UN ACUÍFERO SOMETIDO A SOBREEXPLOTACIÓN, CUENCA DE LA INDEPENDENCIA, GUANAJUATO, MÉXICO
- Hoogesteger J, Wester P (2017) Regulating groundwater use: The challenges of policy implementation in Guanajuato, Central Mexico *Environmental Science & Policy* 77:107-113 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.08.002>
- Hoogesteger van Dijk JD (2017) An elite technology? Drip irrigation, agro-export and agricultural policies in Guanajuato, Mexico. In: Venot J-P, Marcel K, Margreet Z (eds) *Drip Irrigation for Agriculture*. Earthscan/Routledge, Oxon, pp 151-166
- Knappett PSK et al. (2018) Changing recharge pathways within an intensively pumped aquifer with high fluoride concentrations in Central Mexico *Science of The Total Environment* 622-623:1029-1045 doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.031>
- Kresic N, Mikszewski A (2012) *Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization* CRC Press, Boca Raton, FL. doi:<https://doi.org/10.1201/b12151>
- Krivoruchko K (2012) Empirical Bayesian Kriging: implemented in ArcGIS Geo-statistical Analyst ESRI:5
- Krivoruchko K, Gribov A (2014) Pragmatic Bayesian Kriging for Non-Stationary and Moderately Non-Gaussian Data. In: Pardo-Igúzquiza E, Guardiola-Albert C, Heredia J, Moreno-Merino L, Durán JJ, Vargas-Guzmán JA (eds) *Mathematics of Planet Earth: Proceedings of the 15th Annual Conference of the International Association for Mathematical Geosciences*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp 61-64. doi:10.1007/978-3-642-32408-6_15
- Kumar V (2007) Optimal contour mapping of groundwater levels using universal kriging—a case study *Hydrological Sciences Journal* 52:1038-1050 doi:10.1623/hysj.52.5.1038
- Lesser y Asociados (1998) Estudio hidrogeológico y modelo matemático del acuífero del Valle de Silao-Romita, Guanajuato. Lesser y Asociados SA de CV. <http://www.lessor.com.mx/modelos-matematicos-de-flujo-y-contaminantes.html>. Accessed October 1 2017
- Llamas MR (2006) Comment on the article, A participatory approach to integrated aquifer management: The case of Guanajuato state, Mexico By R. Sandoval (H. J. February, 2004) *Hydrogeology Journal* 14:264-264 doi:10.1007/s10040-005-0443-8
- Li Yanmei (2018) Evolution of groundwater availability in the upper catchment of Laja River Watershed, Guanajuato -Mexico.
- Mahlknecht J, Gárfias-Solis J, Aravena R, Tesch R (2006) Geochemical and isotopic investigations on groundwater residence time and flow in the Independence Basin, Mexico *Journal of Hydrology* 324:283-300 doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.021>
- Mahlknecht J, Schneider JF, Merkel BJ, Navarro de León I, Bernasconi SM (2004) Groundwater recharge in a sedimentary basin in semi-arid Mexico *Hydrogeology Journal* 12:511-530 doi:10.1007/s10040-004-0332-6
- Moral, F. (2004) Aplicación de la geoestadística en las ciencias ambientales. *Ecosistema*, 13.

- Navarro de León I (2006) Explotación y renovabilidad del agua subterránea en una cuenca semiárida del Altiplano Mexicano vol 9. Repositorio Universitario Digital UANL, Nuevo Leon
- Navarro de León I, Gárfias-Soliz J, Mahlkecht J (2005) Groundwater flow regime under natural conditions as inferred from past evidence and contemporary field observations in a semi-arid basin: Cuenca de la Independencia, Guanajuato, México *Journal of Arid Environments* 63:756-771
doi:<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.04.003>
- Nornadiah (2011) Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. *Journal of Statistical Modeling and Analytics*, 2: 25.
- Ortega M (2009) Presencia, distribución, hidrogeoquímica y origen de arsénico, fluoruro y otros elementos traza disueltos en agua subterránea, a escala de cuenca hidrológica tributaria de Lerma-Chapala, México *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26:143-161
- Pertega, S., (2001) La distribución normal. *fisterra.com - Atención Primaria en la Red*:
https://www.fisterra.com/mbe/investiga/distr_normal/distr_normal.asp
- SAGARPA (2002) Ley de energía para el campo. Diario Oficial de la Federación (DOF 30-12-2002), México
- Sandoval R (2004) A participatory approach to integrated aquifer management: The case of Guanajuato State, Mexico *Hydrogeology Journal* 12:6-13 doi:10.1007/s10040-003-0311-3
- Scott CA, Shah T (2004) Groundwater overdraft reduction through agricultural energy policy: insights from India and Mexico *International Journal of Water Resources Development* 20:149-164
doi:10.1080/0790062042000206156
- Serra M, Montoya J, Chávez A, Sandoval R (2006) El conocimiento científico y la participación social en la toma de decisiones para el manejo del los acuíferos "caso Guanajuato, México". In: Sánchez-Vila X, Carmen-Cabrera Md, Valverde M (eds) *Jornadas de la toma de datos y la realización de modelos de agua subterránea a la gestión integrada*, Alicante, España, 2006 2005. *Hidrogeología y Aguas Subterráneas*, vol 21. Instituto Geológico y Minero de España, España, p 657
- Sun Y, Kang S, Li F, Zhang L (2009) Comparison of interpolation methods for depth to groundwater and its temporal and spatial variations in the Minqin oasis of northwest China *Environmental Modelling & Software* 24:1163-1170 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.03.009>
- Ta'any RA, Tahboub AB, Saffarini GA (2009) Geostatistical analysis of spatiotemporal variability of groundwater level fluctuations in Amman-Zarqa basin, Jordan: a case study *Environmental Geology* 57:525-535 doi:10.1007/s00254-008-1322-0
- Thomas BF, Famiglietti JS (2015) Sustainable Groundwater Management in the Arid Southwestern US: Coachella Valley, California *Water Resources Management* 29:4411-4426 doi:10.1007/s11269-015-1067-y
- Varouchakis EA, Hristopulos DT (2013a) Improvement of groundwater level prediction in sparsely gauged basins using physical laws and local geographic features as auxiliary variables *Advances in Water Resources* 52:34-49 doi:<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.08.002>
- Varouchakis EA, Hristopulos DT (2013b) Comparison of stochastic and deterministic methods for mapping groundwater level spatial variability in sparsely monitored basins *Environmental Monitoring and Assessment* 185:1-19 doi:10.1007/s10661-012-2527-y
- Wester P, Hoogesteger J, Vincent L (2009) Local IWRM organizations for groundwater regulation: The experiences of the Aquifer Management Councils (COTAS) in Guanajuato, Mexico *Natural Resources Forum* 33:29-38 doi:10.1111/j.1477-8947.2009.01206.x
- Wester P, Sandoval Minero R, Hoogesteger J (2011) Assessment of the development of aquifer management councils (COTAS) for sustainable groundwater management in Guanajuato, Mexico *Hydrogeology Journal* 19:889-899 doi:10.1007/s10040-011-0733-2