

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

ANÁLISIS DE LA DESERTIFICACIÓN Y SU
RELACIÓN CON LOS NIVELES FREÁTICOS
EN EL ACUÍFERO VALLE DEL RÍO YAQUI,
SONORA, MÉXICO

TESIS

Que para obtener el Grado de:
Maestro en Ciencias-Geología



PRESENTA:

GLENDALUPE NORIEGA QUIJADA

Hermosillo, Sonora, Marzo de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

AGRADECIMIENTOS

Principalmente al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por haberme otorgado el apoyo necesario para poder estudiar esta maestría, durante el periodo de 2010 a 2012 con número de registro 349832 y becario 238016.

Al Departamento de Geología de la Universidad de Sonora, principalmente al Dr. Francisco Abraham Paz Moreno, Dr. Miguel Rangel Medina, Dr. Efrén Pérez Segura, Dra. Silvia Martínez Retama gracias por haberme aceptado en la maestría.

Agradezco muy especialmente a la M.C. Margarita de la O Villanueva, por haberme propuesto este tema, apoyado y asesorado durante el desarrollo de este trabajo de tesis. A mi director el Dr. Miguel Rangel Medina por su paciencia, asesoría y estar pendiente de mi formación profesional.

A mis sinodales M.C. Francisco Grijalva Noriega y Dr. Rogelio Monreal Saavedra por sus consejos y asesorías.

Al Dr. Inocente Guadalupe Maldonado, Dra. Diana Meza Figueroa y Dr. Chistopher Watts, gracias por el aprendizaje adquirido a través de sus enseñanzas y asesorías, que de una u otra manera ayudaron al desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres, a mis hermanas y a todas mis sobrinas y sobrinos..... Gracias por su apoyo y estar siempre conmigo.....y a todos los que ya se adelantaron en el camino, en especial a la que hace poco se fue "Nana Pancha".

A mi esposo Orlando por su apoyo incondicional y a mi hija por alegrarme cada día..... los amo.

ÍNDICE

RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1 Antecedentes	3
1.2 Objetivo	5
1.2.1 Objetivos Particulares	5
1.3 Estudios Previos	6
1.4 Localización del Área de Estudio	9
2. MATERIALES Y MÉTODOS	11
2.1 Fase de Recopilación y Base de Datos	11
2.2 Fase de Análisis e Interpretación de Información Obtenida	11
3. MARCO FÍSICO	12
3.1 Hidrografía	12
3.1.1 Características Generales de la Cuenca	13
3.2 Fisiografía	14
3.3 Geomorfología	15
3.4 Geología	18
3.5 Suelos	21
3.6 Vegetación	24
4. CLIMATOLOGÍA	27
4.1 Tipo de Clima	27
4.2 Análisis Climatológico	27
4.2.1 Precipitación	29
4.2.2 Temperatura	30
4.2.3 Evapotranspiración	31
4.3 Climodiagramas	32
4.4 Índices Climatológicos	34
4.4.1 Índice de Aridez de Martonne	34
4.4.2 Índice de Erosión Potencial de Fournier	36
4.4.3 Aplicación de la Metodología Utilizada	37
4.4.3.1 Índice de Calidad del Clima (ICC)	38
4.4.3.2 Índice de Calidad del Suelo (ICS)	42
4.4.3.3 Índice de Calidad de Vegetación (ICV)	46
4.4.3.4 Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD)	51
5. HIDROGEOLOGÍA	54
5.1 Tipo de Acuífero	54
5.1.1 Acuífero Superior	54
5.1.2 Acuífero Regional	54
5.2 Piezometría	55
5.2.1 Profundidad al Nivel Estático	55
5.2.2 Elevación del Nivel Estático	59

5.2.3 Evolución del Nivel Estático	62
5.3 Hidrógrafos	64
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	70
7. CONCLUSIONES	73
8. REFERENCIAS CITADAS	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio	10
Figura 2. Localización hidrológica del área de estudio	14
Figura 3. Provincias y subprovincias fisiográficas en el acuífero Valle del Yaqui (INEGI, Continuo Nacional Fisiográfico 1:000 000	16
Figura 4. Geomorfología del acuífero Valle del Yaqui (INEGI, 2005)	18
Figura 5. Geología del acuífero Valle del Yaqui (SGM, 2002)	20
Figura 6. Tipos de suelos en el acuífero Valle del Yaqui (INEGI, 2007)	24
Figura 7. Tipos de Vegetación en el acuífero Valle del Yaqui (INEGI, 2005)	26
Figura 8. Tipos de climas en el acuífero Valle del Yaqui (Modificado de García, 1964)	28
Figura 9. Estaciones climatológicas y Polígonos de Thiessen en el acuífero Valle del Yaqui	29
Figura 10. Climodiagramas de las estaciones 4P-6 y 4P-12	33
Figura 11. Climodiagramas de las estaciones Calle 200 y Calle 1200	33
Figura 12. Climodiagramas de las estaciones Km 25 y Km 68	33
Figura 13. Climodiagramas de las estaciones Vícam (SMN) y Km 24	34
Figura 14. Climodiagramas de las estaciones Colonia Yaquis y Obregón Obs	34
Figura 15. Distribución del Índice de Aridez para los cuatro periodos analizados en el área de estudio	41
Figura 16. Distribución del Índice de Calidad de Suelo en el área de estudio	45
Figura 17. Distribución del Índice de Calidad de Vegetación en el área de estudio	50
Figura 18. Distribución del Índice de Sensibilidad a la Desertificación en el área de estudio	53
Figura 19. Profundidad al nivel estático para los años 1970, 1980, 1990 y 2000 en el acuífero Valle del Yaqui	57
Figura 20. Profundidad al nivel estático para el año 2008 en el acuífero Valle del Yaqui	58
Figura 21. Elevación del nivel estático para los años 1970, 1980, 1990 y 2000 en el acuífero Valle del Yaqui	60
Figura 22. Elevación del nivel estático para el año 2008 en el acuífero Valle del Yaqui	61
Figura 23 Evolución del nivel estático para los periodos 1970-1980, 1980-1990 y 1990-2000 en el acuífero Valle del Yaqui	63
Figura 24. Localización de los pozos utilizados para cada uno de los hidrógrafos en el área de estudio	64
Figura 25. Hidrógrafo 1	66
Figura 26. Hidrógrafo 2	67
Figura 27. Hidrógrafo 3	68
Figura 28. Hidrógrafo 4	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Precipitación media anual en el acuífero Valle del Yaqui	30
Tabla 2. Temperatura media anual en el acuífero Valle del Yaqui	31
Tabla 3. Evapotranspiración media anual en el acuífero Valle del Yaqui	32
Tabla 4. Clasificación del Índice de Martonne (1926)	35
Tabla 5. Clasificación del Índice de Martonne en el área de estudio	35
Tabla 6. Clasificación del Índice de Fournier (1960)	36
Tabla 7. Clasificación del Índice de Fournier en el área de estudio	37
Tabla 8. Rangos de clasificación del Índice de Calidad de Clima (FMA, 2009)	38
Tabla 9. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 1970-1980, Valle del Yaqui, Sonora	39
Tabla 10. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 1980-1990, Valle del Yaqui, Sonora	39
Tabla 11. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 1990-2000, Valle del Yaqui, Sonora	39
Tabla 12. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 2000-2008, Valle del Yaqui, Sonora	40
Tabla 13. Clasificación del suelo de acuerdo al material de origen (OSS, 2009)	42
Tabla 14. Clasificación de acuerdo al tipo de suelo (OSS, 2009)	42
Tabla 15. Clasificación de acuerdo a la textura del suelo (OSS, 2009)	43
Tabla 16. Clasificación de acuerdo a la pendiente del suelo (OSS, 2009)	43
Tabla 17. Obtención del Índice de Calidad de Suelo en el acuífero Valle del Yaqui	44
Tabla 18. Obtención de la erosión en el área del acuífero Valle del Yaqui	47
Tabla 19. Clasificación para la protección a la erosión (PE) (CLC, 2000)	47
Tabla 20. Clasificación para la resistencia a la sequía (RS) (CLC, 2000)	47
Tabla 21. Clasificación para la cobertura del suelo (CS) (CLC, 2000)	48
Tabla 22. Clasificación para la resistencia al fuego (RF) (CLC, 2000)	48
Tabla 23. Obtención del Índice de Calidad de Vegetación en el acuífero Valle del Yaqui	49
Tabla 24. Clasificación para el Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD) (DISMED, 2008)	51
Tabla 25. Obtención del Índice de Sensibilidad a la Desertificación en el acuífero Valle del Yaqui	52

RESUMEN

El presente trabajo presenta un análisis de la desertificación y su relación de posible impacto sobre los niveles freáticos en el acuífero Valle del Yaqui. Se realizó mediante la determinación de varios índices climatológicos para obtener el grado de afectación del área de estudio y un análisis del comportamiento de los niveles freáticos.

Se utilizó la metodología basada en DISMED (Desertification Information System for the Mediterranean, 2008) donde el índice de sensibilidad a la desertificación y la sequía (ISD), se obtiene de la media geométrica de tres índices que son de calidad de suelo, vegetación y clima. Esta metodología se basa de una serie de variables definidas por el programa CLC (Corinne Land Cover, 1990), que es una base de datos sobre cobertura y uso de suelo en la Unión Europea. Estas dos técnicas se adaptaron para la elaboración de este trabajo, y a partir de información climatológica de las estaciones presentes en el área de estudio, cartas de suelo y vegetación de INEGI, se obtuvieron las bases de datos para realizar el presente trabajo.

Con la información piezométrica de estudios realizados por la Universidad de Sonora (2002, 2004, 2008), se obtuvieron la profundidad, elevación y evolución del nivel estático para distintos periodos; además se elaboraron hidrógrafos para cuatro zonas distintas dentro del acuífero.

Con los resultados obtenidos de los distintos índices y correlacionados con los resultados generados para el Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD), que varían de 0.243 a 0.98, en donde la clasificación es de 1 con el $ISD < 1.2$, que corresponden con áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación, en contraparte, significa que no son tan propensas a que se presente la desertificación, aunque existen zonas en la parte central y este del acuífero que se encuentran muy cerca de la clasificación que las incluye dentro de las zonas sensibles. Estas zonas coinciden de igual manera con las correspondientes con los mayores valores de clasificación, asignados para los índices de aridez, erosión, clima, suelo y vegetación.

Al comparar los resultados de la distribución de cada uno de los índices analizados y los de la piezometría se observa que en la parte este del acuífero, se tienen las zonas que se encuentran muy cerca de la clasificación de zona sensible a la desertificación (Estaciones Km 14, Km 24, Km 25 y Bachoco), y es también en donde los valores de la

profundidad y elevación del nivel freático son altos o próximos a la superficie, los cuales se han ido incrementando gradualmente con el transcurso de los años como resultado de la operación del sistema hidroagrícola. De igual manera, al analizar el comportamiento del nivel estático de los hidrógrafos que se localizan mas próximos a la zona cercana y más sensible a la desertificación, se puede observar un ligero descenso de la profundidad del nivel estático, en este caso debido probablemente al sobrebombeo local del acuífero regional, a la escasa infiltración hacia el acuífero por la falta de lluvias, ya que éstos pozos se encuentran en la zona de recarga local, o muy cercanos al cauce principal del río Yaqui, que muestra ausencia de gasto base afectado por el mismo sobrebombeo.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

La desertificación es un fenómeno que se presenta en las zonas áridas alrededor del planeta, las cuales abarcan una tercera parte de la superficie continental y que perjudica directa e indirectamente a millones de personas. La Convención de las Naciones Unidas para la lucha contra la desertificación la definió como “la degradación de las tierras en áreas áridas, semiáridas y subhúmedas secas, resultante de diversos factores, tales como las variaciones climáticas y las actividades humanas” (UNCCD, 1994). Oropeza-Orozco (1999), la define como un fenómeno muy complejo que se relaciona con el deterioro de los ecosistemas, la reducción del potencial biológico y la pérdida de la productividad del suelo, debido, fundamentalmente, a las variaciones climáticas y las actividades humanas en las zonas áridas del planeta, mientras que Izquierdo (1995) la menciona de una forma sencilla, como una ruptura de frágil equilibrio que hizo posible el desarrollo de la vida en zonas áridas del planeta.

Actualmente la desertificación es considerada como un problema geológico ambiental de gran importancia mundial, el cual se encuentra relacionado con otros de carácter global como son el cambio climático, la disminución de la biodiversidad, la poca disponibilidad de recursos hídricos, el sobrepastoreo, la sobreexplotación de suelos, el empobrecimiento y la migración de la población, entre otros.

Por lo tanto, las causas de la desertificación son de origen natural y antropogénico y la sequía puede ser el factor natural que más la acelera cuando se presenta. Aunque también existen otros fenómenos atmosféricos, que pueden influir en su intensificación, como los huracanes, granizadas y heladas. Dentro de los factores antropogénicos que pueden derivar el proceso de desertificación se encuentran: la agricultura de riego y temporal (implica el uso inadecuado de tecnologías, mal manejo del riego y drenaje, abuso de plaguicidas y fertilizantes o carencia de fertilizantes orgánicos, pérdida de control de fuego en labores agrícolas, reducción del tiempo de barbecho de las tierras cultivadas); la ganadería y el pastoreo (uso descontrolado del fuego para la regeneración de pastos, sobrepastoreo); la actividad forestal (extracción excesiva de madera y leña, pérdida de la cubierta vegetal, incendios forestales); el desarrollo urbano e industrial (asentamientos humanos sobre suelos fértiles, contaminación del suelo y agua), y los cambios de usos del suelo (Oropeza-Orozco, 1994).

Actualmente las tierras secas del planeta ocupan 41.3%, y están distribuidas principalmente en Asia, norte de África y la mayor parte de Australia. En los países desarrollados se encuentra el 28% del total de las tierras secas del mundo y el 72% en los países pobres (MEA, 2005). La UNCCD calcula que entre el 71% y 75% de las zonas secas del mundo están desertificadas.

En México se considera que la desertificación puede darse en todos los ecosistemas, pero es innegable que los secos son los más vulnerables. Las zonas muy áridas y áridas se encuentran principalmente en Baja California, Coahuila, Chihuahua y Sonora, representando 49% del total de las tierras secas del país. Las zonas semiáridas abarcan 29%, estando distribuidas en su mayoría en el desierto Sonorense y en los estados del altiplano mexicano; y el 22% corresponde a las zonas subhúmedas secas de Campeche y Yucatán, el Golfo de México y las costas del Océano Pacífico (Conabio, 1996).

En las zonas semiáridas y subhúmedas secas de México se concentra alrededor del 75% de la población, debido a que en ellas, los suelos son más productivos. El 60% de la superficie agrícola del país se encuentra en las tierras secas, y de ese total, el 42% se ubica en las zonas semiáridas y el 30% en las subhúmedas secas (SEMARNAT, 2003).

Trabajos específicos sobre desertificación en México son muy pocos, los únicos publicados son los de Aguirre-Salado, *et al.* (2012), que habla de la influencia de la desertificación sobre el clima y la lucha en México por la desertificación. En Chihuahua se efectuó un estudio sobre el desarrollo de indicadores socioeconómicos y sociopolíticos de la desertificación para evaluar el estado actual de este proceso en la cuenca del río Conchos, procurando identificar y caracterizar tendencias espaciales de dicho proceso (Velásquez, 2007), mientras que en el estado de Sinaloa se propuso recientemente un proyecto para la obtención de zonas propensas a la desertificación en todo el estado a través del análisis de imágenes satelitales y técnicas de Percepción Remota (PROFAPI-2012). Un estudio más reciente explica de manera general (Granados-Sánchez, *et al.* 2013) sobre los aspectos relacionados con la extensión y severidad de la desertificación mundial, así de como las particularidades de la degradación de la tierra en México.

Casi la totalidad de la superficie territorial de Sonora cae dentro de la clasificación climática de zona árida (López-Reyes, 2005), tal situación representa un alto riesgo de desertificación debido a la fragilidad natural de los suelos; a esta vulnerabilidad natural se añaden los factores asociados al tipo de prácticas desarrolladas en las distintas

actividades productivas. En 1995, el Instituto Nacional de Ecología consideró a casi todo el estado como una zona con alto grado de desertificación.

El uso del suelo en Sonora ha estado tradicionalmente orientado hacia actividades agropecuarias. El 88% de la superficie total de la entidad se dedica a actividades agrícolas y ganaderas, y en el 12% restante se ubican las actividades industriales, mineras, turísticas y los asentamientos humanos. La ganadería de Sonora se practica de manera extensiva mediante el libre pastoreo del ganado en aproximadamente el 84% de la superficie estatal; las actividades agrícolas, por su parte, ocupan el 4% del territorio del estado (Gobierno del Estado de Sonora, Programa de Desarrollo Agropecuario 1998 – 2003).

El único trabajo de carácter formal que habla sobre la degradación de los suelos en el estado de Sonora a partir de procesos erosionales es el de López-Reyes (2005), dándole gran énfasis al proceso de erosión de los suelos, atribuyéndolo a causas de carácter ganadero y extracción de productos maderables. De tal forma que no existen trabajos de carácter científico sobre el proceso de desertificación en el estado.

Como se pudo observar es de suma importancia llevar a cabo este tipo de estudio, ya que esto nos indica al menos la línea base del estado de degradación de nuestros suelos y donde, además la aridez es la que predomina casi en su totalidad. Esto influye de manera directa a tener zonas con alta vulnerabilidad a la desertificación en el estado.

1.2 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis de la desertificación y su relación de posible impacto sobre los niveles freáticos en el acuífero Valle del Yaqui.

1.2.1 Objetivos Particulares

- ❖ Determinación de varios índices climatológicos como son de aridez, erosión, suelo y vegetación con la finalidad de obtener el grado de afectación del área de estudio.
- ❖ Análisis del comportamiento de nivel freático en el acuífero Valle del Yaqui.
- ❖ Establecer una relación entre los índices obtenidos y la variación del nivel freático.
- ❖ Obtener un plano del acuífero Valle del Yaqui con las áreas más propensas a la desertificación.

1.3 Estudios Previos

Para llevar a cabo este estudio se consultaron los trabajos relacionados con investigaciones geográficas, ambientales e hidrológicas realizadas tanto en el estado como en el valle del Yaqui. Entre los que más influyeron en esta investigación están:

- ❖ Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Boletín Técnico No. 10, “Salinidad de los Suelos Agrícolas: Su Origen, Clasificación, Prevención y Rehabilitación” (1981). La fuente original de donde provienen las sales del suelo y del agua, es de los minerales que se encuentran formando las rocas que constituyen la corteza terrestre. La formación de las sales se realiza mediante el proceso de intemperización, de las rocas donde se liberan los minerales que constituyen los suelos. La recuperación de los suelos con problemas de sales son semejantes; sin embargo las metodologías a seguir en los distintos tipos de suelos difieren fuertemente en técnica y métodos, esto depende de la composición química que presente cada tipo de suelo.
- ❖ Geólogos Consultores Asociados, S.A. (1979), llevó a cabo el “Estudio de las condiciones geohidrológicas, sitios adecuados perforación y delimitación de acuíferos terciarios de los Valles intermontanos de Yecora, Río Chico, Los Cedros, Jincora y Cocoraque, Estado de Sonora”.
- ❖ El Instituto de Estudios, Investigaciones y Servicios Agrípef Chapingo, S.C., (1986) realizó una “Evaluación de la eficiencia hidráulica y electromecánica de los pozos del Distrito de Riego del Río Yaqui, Sonora”.
- ❖ Gómez Aldama Oscar Rubén (1992), desarrolló la tesis de maestría “Un modelo de programación por redes para planear la operación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora”.
- ❖ González E. Rodrigo (1992), llevó a cabo el estudio “Evolución de la salinidad y contaminación por agroquímicos en el acuífero del valle del Yaqui, Sonora”.
- ❖ Lozano Cota Luis Manuel (1992), desarrolló la tesis de maestría “Un modelo de programación lineal para la planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora”.
- ❖ El Instituto Tecnológico de Sonora (1996), llevó a cabo el estudio “Planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora”.

- ❖ Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V., (1996), realizó el estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de El Yaqui, Hermosillo y Caborca, en el Estado de Sonora. Elaborado para la Comisión Nacional Del Agua.
- ❖ El Instituto Tecnológico de Sonora (1997), propuso las “Alternativas para reducir la presencia de Fierro y Manganeso que exceda los límites establecidos en las normas para el agua potable, en el abastecimiento de la zona de Guaymas-Empalme”.
- ❖ Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V. (1997), llevó a cabo la “Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en 1996 (PROMMA), en los Estados de Sonora y Chihuahua”.
- ❖ Ansaldo Leyva Julio César (1999), desarrolló la tesis de maestría “Estimación de la aportación media por infiltración del canal principal bajo en la sección de la batería de pozos que abastecen a Guaymas-Empalme en el Acuífero del Valle Aluvial del Río Yaqui”.
- ❖ Martínez Uribe María Esther (1999), desarrolló la tesis de maestría “Caracterización hidrogeológica de las formaciones volcánicas y sedimentarias en el Valle de Boca Abierta, Sonora”.
- ❖ El Instituto Tecnológico de Sonora (2000), realizó el “Estudio de disponibilidad y actualización hidrogeológica en los acuíferos de los valles de: El Yaqui, El Mayo, Boca Abierta y Guaymas, Sonora”.
- ❖ Ivette Concepción Zapuche Moreno (2000), desarrolló la tesis de maestría “Hidrogeoquímica de la franja costera del acuífero del Valle del Yaqui, Sonora”.
- ❖ Esquer Villalobos Noel Osvaldo (2001), desarrolló la tesis de maestría “Localización de la interfase salina en los valles de Boca Abierta y Guaymas, Sonora y una propuesta de manejo para sus acuíferos”.
- ❖ Flores Tapiz Reyna Isabel (2001), desarrolló la tesis de maestría “La calidad del agua para riego agrícola de pozos profundos del Valle del Yaqui con énfasis en toxicidad de Boro, Cloruros y Sodio”.
- ❖ Navarro Ibarra Lizzeth A. (2001), tesis de maestría “Modelo de optimización-simulación para generar políticas de extracción en el acuífero del Valle del Yaqui, Sonora”.

- ❖ Departamento de Geología de la Universidad de Sonora (2003), realizó el “Estudio de Actualización Geohidrológica del Acuífero Valle del Yaqui Municipio de Cajeme Sonora”. A partir de la interpretación de las pruebas de bombeo y la correlación con la estratigrafía y geofísica, se definió que existen tres tipos de acuíferos: libre, semiconfinado y confinado. Las elevaciones del nivel estático para los años de 1997 a 2002, muestran poca variación en la parte central del valle, de 5 a 15 m en 1997 con pequeñas zonas de abatimiento entre Villa Juárez y Pueblo Yaqui. Se han desarrollado conos de abatimiento en la porción central y norte del valle, donde los abatimientos más marcados son de 3 m, próximos al lecho del río Yaqui y al sur de Marte R. Gómez con abatimientos de hasta 4 m. Sin embargo, las elevaciones pasaron entre 10 y 15 m en el año 2002, las zonas de recuperación mas importantes alcanzan hasta 4 m, próximas al arroyo Cocoraque, al sureste del valle y en la parte central con 2.8 m hasta el equilibrio.
- ❖ Gutiérrez Heredia Rosa Elvira (2004), tesis de Licenciatura Departamento de Geología “Evolución Geomorfológica del Valle del Yaqui” y su influencia en los Parámetros Hidrogeológicos e Hidrogeoquímicos.
- ❖ Samantha Emylou Cirett Galán (2006), tesis de Licenciatura Departamento de Geología “Diseño de una Red de Monitoreo Piezométrico Utilizando SIG y Geoestadística”. El objetivo de este trabajo fue la necesidad de monitorear el agua subterránea para de esta manera establecer una comparación, que permita a la sociedad como a las autoridades involucradas en el manejo del recurso agua, la obtención y optimización de una red de monitoreo piezométrico para el Valle del Yaqui.
- ❖ Grijalva Montoya Adrián (2008), tesis de Licenciatura Departamento de Geología “Hidroestratigrafía del Acuífero del Valle del Río Yaqui, Sonora”. En este estudio se definieron las unidades hidroestratigráficas en el acuífero, así como se interpreta que el ambiente característico de los sedimentos depositados en la cuenca del Valle del Río Yaqui corresponde, a ambientes sedimentarios fluviales.

1.4 Localización del Área de Estudio

El área de estudio corresponde al acuífero administrativo Valle del Yaqui, en donde se encuentra una de las zonas de producción agrícola más importante del país. Se localiza en el sur del estado de Sonora entre los paralelos 27°00' y 27°40' de latitud norte y entre los meridianos 109°40' y 110°25' de longitud oeste, abarcando un área aproximada de 5000 km². Limita al norte con el acuífero Valle de Guaymas, Agua Caliente y Cumuripa; al sur con el Golfo de California o Mar de Cortés; al este con el acuífero Cocoraque y la cuenca del río Mayo y al oeste con el Golfo de California. Abarca los municipios de Cajeme, Bécum, Guaymas y San Ignacio Río Muerto, entre las poblaciones más importantes que se encuentran dentro del acuífero están: Ciudad Obregón, Esperanza, Villa Juárez y Vícam, entre otras (Figura 1).

La principal vía de acceso al área de estudio es por la carretera federal número 15 México-Nogales, la cual cruza el acuífero por la parte central, paralela a ésta se extiende la ruta ferroviaria del Pacífico que viene desde Guadalajara, Jalisco hasta Nogales, Sonora. Ciudad Obregón cuenta con un aeropuerto con servicio a vuelos nacionales e internacionales. El resto de los poblados, campos y ranchos se encuentra comunicado por carreteras pavimentadas, caminos de terracería, brechas y veredas.



Figura 1. Localización del área de estudio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Fase de Recopilación y Base de Datos

Esta fase consistió en la recopilación de la información existente sobre el área, planeación de estrategias para la obtención de datos no existentes, así como la generación de las diferentes bases de datos y mapas para su posterior análisis.

2.2 Fase de Análisis e Interpretación de Información Obtenida

- ❖ Descripción del entorno fisiográfico, geológico, geomorfológico, climatológico e hidrológico del área de estudio.
- ❖ Con la información obtenida de las estaciones climatológicas se obtuvo la precipitación, temperatura y evapotranspiración medias anuales, se elaboraron climodiagramas y se calcularon los índices de aridez de Fournier (1960) y Martonne (1926).
- ❖ Se utilizó la metodología basada en DISMED (Desertification Information System for the Mediterranean, 2008), en donde la sensibilidad a la desertificación y la sequía están definidas por un índice (ISD), el cual se obtiene de la media geométrica de tres índices que son de calidad de suelo, vegetación y clima. Esta metodología se basa en gran medida a partir de una serie de variables definidas por el programa CLC (Corinne Land Cover, 1990), que es una base de datos sobre cobertura y uso de suelo en la Unión Europea. Adaptándose estas dos técnicas a este trabajo, donde a partir de información climatológica de las estaciones presentes en el área de estudio, cartas de suelo y vegetación de INEGI, se pudieron obtener las bases de datos para el presente trabajo.
- ❖ Se calcularon cada uno de los índices; el de calidad de clima, suelo, vegetación y el de desertificación, posteriormente se elaboraron tablas y los planos en donde se muestra su clasificación y distribución en el acuífero.

- ❖ Con los datos piezométricos de estudios realizados por la Universidad de Sonora en 2003 y años posteriores se obtuvo la elevación y evolución del nivel estático para cuatro periodos, se elaboraron las configuraciones de profundidad, elevación y evolución del nivel estático y se plasmaron en un plano.
- ❖ Se realizaron hidrógrafos para cuatro zonas distintas dentro del acuífero del año de 1970 a 2002.
- ❖ Se compararon los planos obtenidos de cada uno de los índices con los de la profundidad, elevación y evolución, también con los hidrógrafos con la finalidad de establecer la relación que existe.
- ❖ Finalmente se interpretaron en conjunto los elementos citados obteniéndose los resultados que se presentan.

3. MARCO FÍSICO

3.1 Hidrografía

En el estado de Sonora las principales corrientes son aprovechadas mediante presas que son empleadas para el control de avenidas, agricultura, ganadería y generación de energía eléctrica. Las corrientes más importantes del estado se localizan en la parte noreste, este y sur. En cambio, en la porción noroeste el clima es seco, por lo que no es posible la formación de corrientes perennes, aunque se presentan algunas intermitentes, por lo general el agua se extrae del subsuelo.

De acuerdo con la división de regiones hidrológicas, elaborada por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, dentro del estado de Sonora se encuentran cinco regiones: Río Colorado (RH-7), Sonora Norte (RH-8), Sonora Sur (RH-9), Sinaloa (RH-10), Cuencas Cerradas del Norte (RH-34).

El área de estudio se encuentra dentro de la Región Hidrológico Administrativa II Noroeste y a su vez en la Región Hidrológica Sonora Sur (RH-9). Esta región ocupa el 63.64% de la superficie en Sonora, se extiende en la porción oriental desde Agua Prieta hasta Yávaros

y parte de Chihuahua. Tiene un relieve con fuertes contrastes altimétricos, y la mayoría de sus corrientes nacen en la Sierra Madre Occidental y descargan en el Golfo de California.

La Región Hidrológica Sonora Sur se encuentra integrada por cinco cuencas que contienen las corrientes principales del estado: Cuenca Río Mayo, Río Yaqui, Río Mátape, Río Sonora y la del Río Bacoachi (Figura 2). El área de estudio se encuentra dentro de la Cuenca Río Yaqui, la cual es la más importante en cuanto a extensión, ya que ocupa el 29.98% del territorio estatal, y de la subcuenca Río Yaqui-Vícam.

3.1.1 Características Generales de la Cuenca

La Cuenca del Río Yaqui comprende 71,452 km², de esta superficie, el 74% se encuentra dentro del estado de Sonora, el 21% en el estado de Chihuahua y el 5% en el estado de Arizona en Estados Unidos.

Los escurrimientos de la cuenca se utilizan, en su mayoría, para irrigar el valle del Yaqui en el sur del estado, ya que es una de las zonas agrícolas con mayor superficie irrigada en México. Dentro de la cuenca la corriente principal es la del río Yaqui, el cual drena de norte a sur el estado de Sonora, nace en la Sierra Madre Occidental y desemboca en el Golfo de California. Tiene una longitud aproximada de 600 kilómetros en Sonora, pero al integrarlo con el río Papigochi de Chihuahua alcanza una longitud de 1050 kilómetros. Otras corrientes de importancia que se encuentran dentro de esta cuenca como afluentes de la principal son: los ríos Bavispe, Moctezuma, Sahuaripa, Bacanora, los arroyos Cerro Colorado, Nacori Chico, Bachoco y Cuquiarachic, entre otros, sobre los cuales también se encuentran presas de menor tamaño.

Sobre la influencia de este río se localizan las presas Plutarco Elías Calles (El Novillo), Álvaro Obregón (El Oviachic) y Lázaro Cárdenas (La Angostura), esta última sobre el afluente río Bavispe, las cuales irrigan la zona agrícola del valle del Yaqui y Vícam, y la primera funciona como una hidroeléctrica.

La parte baja de la cuenca del río Yaqui abarca desde la presa El Oviachic hasta su desembocadura en el Golfo de California, en esta zona se observa un sistema fluvial meándrico, principalmente en las zonas del litoral, en donde también se presenta la formación de lagunas costeras. Este valle es una zona muy fértil, debido a que corresponde al antiguo delta del río Yaqui, donde se depositó una gran cantidad de

sedimentos finos y de tamaño medio que favorecen que la tierra sea propicia para el desarrollo de actividades agrícolas.

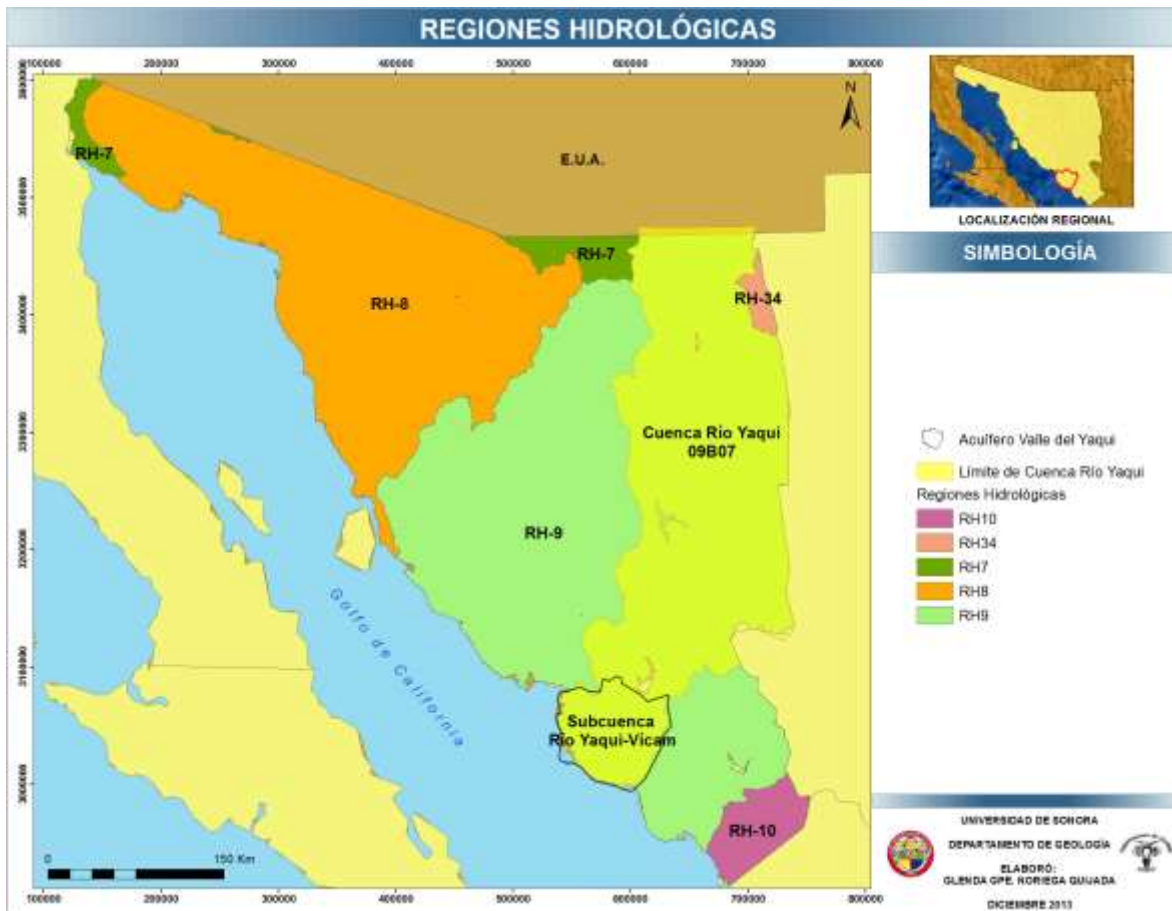


Figura 2. Localización hidrológica del área de estudio.

3.2 Fisiografía

La cuenca del Río Yaqui se encuentra dentro de cuatro provincias fisiográficas: Sierra Madre Occidental, Sierras y Llanuras del Norte, Llanura Sonorense y una parte de la Llanura Costera del Pacífico (INEGI, 2005). Dentro de estas provincias se tienen las subprovincias: Sierras y Cañadas del Norte, Sierras y Valles del Norte, Llanuras y Médanos del Norte, Sierras y Llanuras Sonorenses y Llanura Costera y Deltaica de Sonora y Sinaloa.

El acuífero Valle del Yaqui se localiza una porción en la provincia Llanura Sonorense y el resto en la Llanura Costera del Pacífico (INEGI, 2005). A su vez, queda en la subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses y en la Llanura Costera y Deltaica de Sonora y Sinaloa (Figura 3).

La provincia Llanura Sonorense se caracteriza por presentar sierras paralelas con orientación noroeste y sureste, separadas por grandes bajadas de aluviones y llanuras amplias hacia la costa. Las laderas montañosas son abruptas y abundan los cauces de arroyos. La Llanura Costera del Pacífico está constituida por una llanura costera angosta y alargada cubierta por aluviones depositados por ríos que bajan desde la Sierra Madre Occidental, los cuales han formado deltas en los litorales.

La subprovincia Sierras y Llanuras Sonorenses se encuentra formada por sierras bajas separadas por llanuras. Estas sierras se encuentran constituidas por rocas ígneas intrusivas ácidas, lávicas, metamórficas, calizas y conglomerados. Las pendientes son abruptas mayores de 45° y son raras las menores a 20°. Las llanuras representan casi el 80% de la subprovincia, están cubiertas de amplios abanicos aluviales que descienden con pendientes suaves.

La subprovincia Llanura Costera y Deltas de Sonora y Sinaloa está integrada por los deltas del río Yaqui, Mayo y Fuerte, en los cuales se ubican extensos distritos de riego. Se encuentra constituida por material aluvial, la línea de costa es sinuosa con bahías y esteros (INEGI, 2005).

3.3 Geomorfología

Dentro del acuífero Valle del Yaqui se presentan cuatro geoformas principales: montañas, lomeríos, pie de monte y planicies, las cuales se clasifican en base a la forma, altura, pendiente, litología y edad. La altura se tomó en cuenta de la base a la cima de la unidad, caracterizándose como lomeríos, pie de monte y planicies todos los cuerpos que presentan una elevación menor a los 300 m y para montañas las elevaciones mayores a los 300 m. La estabilidad de la pendiente se clasificó en pendiente estable de 0 a 10°, pendiente metaestable entre 10 a 30° y pendiente inestable superiores a los 30°. Otros factores tomados en cuenta son la litología y la edad que varía desde el Cretácico Superior al Holoceno (INEGI, 2005). En la Figura 4 se observa la geomorfología presente en el área de estudio.

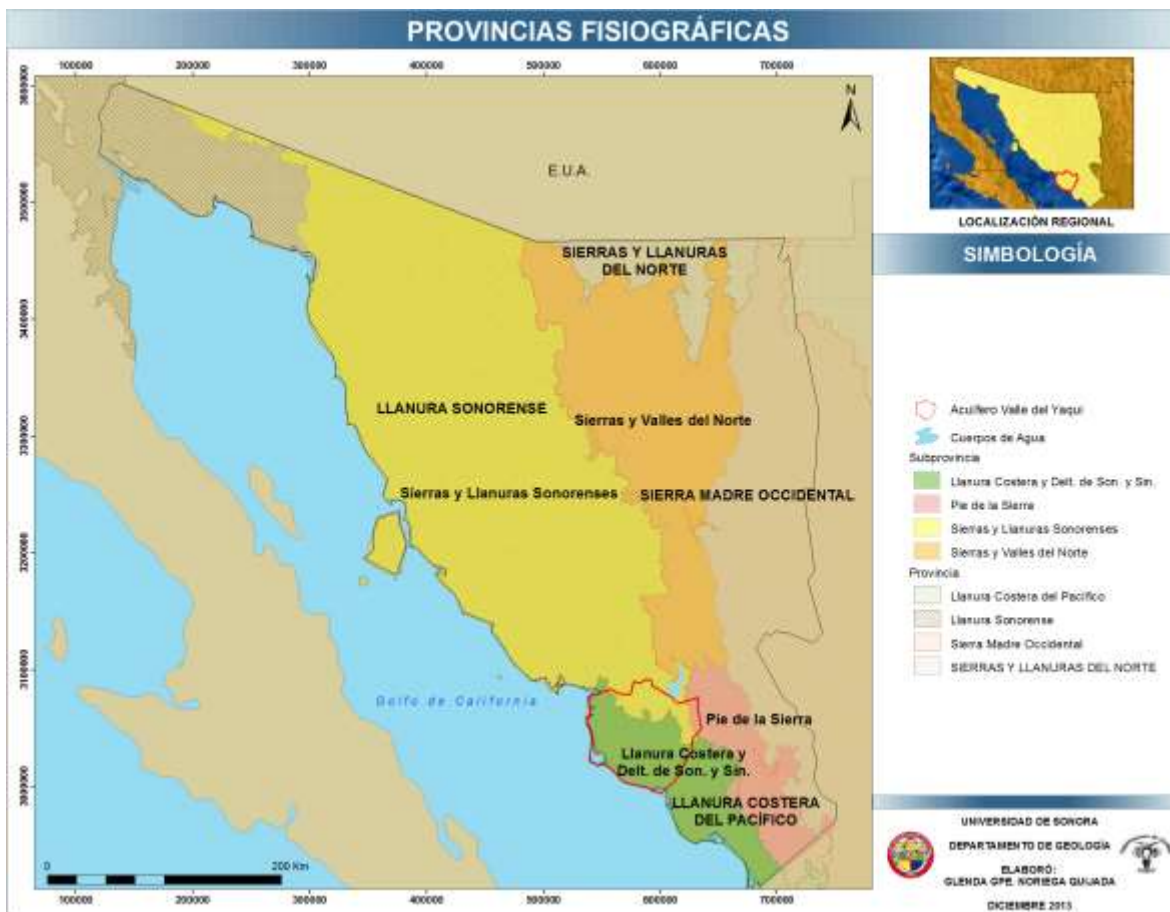


Figura 3. Provincias y subprovincias fisiográficas en el acuífero Valle del Yaqui (INEGI, Continuo Nacional Fisiográfico 1:000 000).

Lomeríos

Lomerío de pendiente estable (Lo E): Se encuentra constituido por roca volcánica intermedia y es de edad Cretácico Superior. Se distribuye en la parte norte y este del acuífero.

Lomerío de pendiente metaestable (Lo M): Es de origen estructural denudativo constituido por rocas plutónicas intermedias y ácidas de edad Cretácico Superior al Paleoceno. Se presenta principalmente en la parte noreste del acuífero.

Montañas

Montaña alta de pendiente inestable (Ma I): Esta unidad es de origen volcánico denudativo, constituida por rocas volcánicas intermedias y ácidas de edad Terciario

Inferior y corresponden a las zonas con mayor elevación en la parte noroeste y este del área.

Montaña alta de pendiente metaestable (Ma M): Se localiza en pequeñas zonas al este del acuífero y está formada por rocas volcánicas intermedias y ácidas de origen denudativo del Oligoceno.

Montaña baja de pendiente metaestable (Mb M): Esta unidad presenta elevaciones menores a los 1000 m, constituidos por rocas volcánicas intermedias y ácidas del Oligoceno, se localiza en pequeñas zonas al norte y una al este del acuífero.

Piedemonte

Piedemonte de pendiente estable (Pi E): Esta unidad es de origen denudativo, constituida por gravas, arenas, limos y arcillas del Pleistoceno se encuentra rodeando a los lomeríos metaestables.

Piedemonte de pendiente metaestable (Pi M): Esta formada por rocas volcánicas intermedias y ácidas, es de origen denudativo, de edad Mioceno y se presenta rodeando a las montañas altas (SGM, 2002).

Planicies

Planicie aluvial (Pl al): Se encuentra formada por gravas, arenas, limos y arcillas de origen fluvial de edad Holoceno.

Planicie costera activa (Pl Ca): Esta unidad es de origen lacustre-marino constituida por gravas, arenas, limos y arcillas, localizada en toda la línea de costa.

Planicie aluvial divergente superior (Pl divsup): Se distribuye en toda la parte noroeste y este del área de estudio, constituida por gravas, arenas, limos y arcillas de origen fluvial.

Planicie con actividad antrópica (Plan al): En esta unidad se encuentra la zona agrícola del acuífero y se constituye por gravas, arenas, limos y arcillas del Holoceno, es de origen antropogénico.



Figura 4. Geomorfología del acuífero Valle del Yaqui (INEGI, 2005).

3.4 Geología

En el acuífero Valle del Yaqui hay distintas unidades estratigráficas que varían su edad desde el Cretácico Inferior al Holoceno, su nomenclatura está basada en los trabajos realizados por el Servicio Geológico Mexicano (SGM, 2002). Las unidades que afloran en el área son: Cretácico Superior (granito-granodiorita); Terciario Oligoceno-Mioceno (toba e ignimbrita); Terciario Mioceno (conglomerados y volcanoclásticas); Terciario Mioceno (basalto); Terciario Indiferenciado (volcánicas); Cuaternario-Pleistoceno (conglomerado y arenisca); y Reciente (gravas, arenas y arcillas) (Figura 5).

Las unidades paleozoicas y cretácicas se encuentran afectadas por cuerpos intrusivos graníticos y granodioríticos de edad Cretácico-Terciario (KsTpaGr-Gd y KsTeGr-Gd), e intrusiones de tipo pórfido monzonítico.

Sobreyaciendo discordantemente, aflora El Grupo Yécora (Tolg-TR, To (?)R-Da, TmA-Da, TmTR-R, TmTRd-Rd, TmTR-A, TmTR-B y TmB-A) de edad Oligoceno y Mioceno, que agrupa una serie de secuencias volcánicas, volcanoclásticas y piroclásticas de composición principalmente ácida e intermedia, constituida por ignimbritas, conglomerados, areniscas, tobas riolíticas, tobas riodacíticas, riodacitas, riolitas, dacitas y basaltos. Intrusivos hipabisales andesíticos y riodacíticos (ToPA y ToPRd) afectan a estas unidades, cuyos afloramientos se localizan en la parte norte del acuífero.

Durante el Mioceno se desarrolló una sedimentación en ambientes de abanicos aluviales, sistemas fluviales y lacustres, por lo que afloran discordantemente conglomerados polimícticos y areniscas (TmCgp-Ar), localizados en la parte este del acuífero, cuyo color es pardo que cambia de tonalidad por intemperismo. Estas rocas representan una sedimentación continental ligada a la distensión terciaria de Cuencas y Sierras. Se presentó una actividad volcánica bimodal correspondiente al Grupo Rosario (TmCgp-B); así como la unidad denominada Basalto Sierra Oscura (TmB) de edad Mioceno tardío, el cual se caracteriza por presentarse como derrames y brechas que varían a andesita basáltica, la textura es siempre afanítica con poco olivino en pequeños cristales, aunque también los hay de carácter toleítico.

Del Plioceno al Holoceno se desarrolla una amplia actividad erosiva y se originan secuencias fluviales y fluviodeltáicas de sedimentos mal consolidados y no consolidados. Se tiene la presencia de areniscas y conglomerados polimícticos que corresponden al Grupo Sonora (TplCgp-Ar, QptCgp-ar), con horizontes de limolitas y coquinas, estas unidades afloran discordantemente en la parte central este del acuífero.

Durante el Pleistoceno se depositaron nuevos paquetes detríticos de conglomerados polimícticos (QptCgp) mal consolidados, gravas y arenas (Qptgv-ar) que afloran en grandes extensiones en la porción norte y oeste del acuífero; finalmente en el Holoceno se depositaron en las partes cercanas a la línea de costa, materiales de tipo aluvial (Qhoar, Qholm-ar y Qhoal), eólico (Qhoeo), lacustre (Qhola) y palustre (Qhopa).

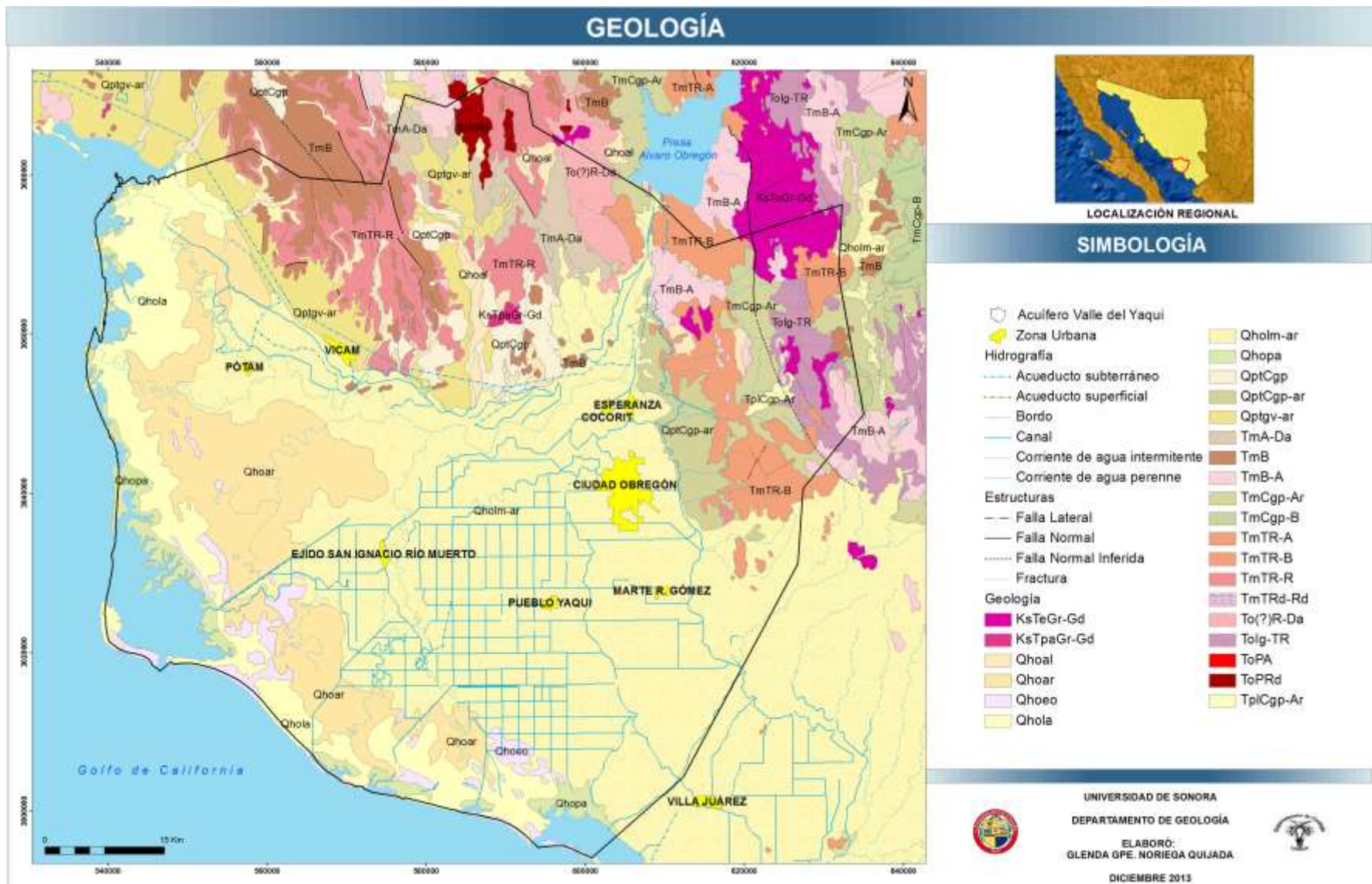


Figura 5. Geología del acuífero Valle del Yaqui (SGM, 2002).

3.5 Suelos

En el estado de Sonora la mayor parte de los suelos son jóvenes (68%), entre ellos se encuentran las unidades de Litosol y Regosol. Existen otros que se encuentran entre los suelos jóvenes y los maduros, como son Yermosol, Xerosol y Cambisol, que representan el 27% de la superficie estatal. En zonas con pendientes altas y en las zonas cercanas a la Sierra Madre Occidental se encuentran los suelos más evolucionados, como son el Luvisol, Feozem y Gleysol, los cuales ocupan el 5.3% de la superficie estatal (INEGI, 2007). En el área correspondiente al acuífero Valle del Yaqui se presentan los siguientes tipos de suelos (Figura 6):

Cambisol: Se desarrolla sobre materiales de alteración procedentes de un amplio abanico de rocas, entre ellos destacan los depósitos de carácter eólico, aluvial o coluvial. Aparecen sobre todas las morfologías, climas y tipos de vegetación. Permiten un amplio rango de posibles usos agrícolas. Sus principales limitaciones están asociadas a la topografía, bajo espesor, pedregosidad o bajo contenido en bases. En zonas de elevada pendiente su uso queda reducido al forestal. Se distribuye en una pequeña zona en la parte norte por fuera de los límites del área de estudio.

Fluvisol: Este tipo de suelo está formado de materiales aluviales recientes, que han sido depositados en los lechos de ríos, o bien en las bajadas de las sierras, hacia donde escurre el agua. Los constituyen capas superpuestas de horizontes c y son sueltos o de estructura laminar, pero algunas veces llegan a desarrollar en la superficie, o cerca de ella, un horizonte a, ocríco sumamente permeable y de colores claros. La vegetación que presentan es de matorral sarcocaula en los alrededores de la presa Álvaro Obregón.

Litosol: Este tipo de suelo se distingue por tener una profundidad menor a los 10 cm, son pedregosos y poco desarrollados que pueden contener una gran cantidad de material calcáreo. Se localiza en las sierras, en laderas, barrancas y malpaís, así como en lomeríos y algunos terrenos planos. Su potencial agrícola está limitado por su poca profundidad y alta pedregosidad, lo que los hace difícil de trabajar. Su susceptibilidad a la erosión depende de la zona en donde se encuentren, de la topografía y del mismo suelo. Se localizan en la parte norte y este del área de estudio.

Regosol: Este suelo se ha formado a partir de rocas ígneas ácidas y básicas, como también de algunas rocas sedimentarias como conglomerado y lutita-arenisca. Algunos

otros son de origen residual (*in situ*); otros son de origen aluvial, coluvial o eólico; en los cuales el material intemperizado que los constituye ha sido acarreado de otras zonas, por medio del agua, la gravedad y el viento, respectivamente (INEGI, 1970).

Estos suelos son muy parecidos a la roca de donde se originan, solo presentan una capa superficial de colores pardo amarillento o pardo rojizo que pertenece al horizonte *a*, *ocrico* y carecen de estructura. Son muy pobres en materia orgánica, sus texturas van de arena a migajón arenoso y su capacidad de intercambio catiónico total es baja o muy baja. En general, se distribuyen en la porción noroeste y este.

Solonchak: Estos suelos son de elevada salinidad, se localizan principalmente en la zona costera. Son suelos jóvenes de origen litoral y aluvial que han desarrollado un horizonte *a*, *ocrico*, el cual sobreyace a un *b*, *cambico*. Presentan color pardo o gris con tinte rojizo, su textura va de migajones arenosos a arcillosos. Gran parte del complejo de intercambio se encuentra saturado con sodio, motivo por el cual, son extremadamente alcalinos, con pH hasta de 10.3. Su salinidad varía de moderada a fuertemente salina, los iones más comunes son cloruros, sulfatos, carbonatos, sodio y fósforo. Sobre ellos se desarrolla vegetación halófila.

Vertisol: Se localizan en la parte norte, este y sur del área de estudio. Estos suelos se caracterizan por tener un horizonte *a*, *umbrico*, que posee más de 30% de arcilla, al menos en los primeros 50 cm del perfil; dicha arcilla (*montmorillonita*) cuando está húmeda se expande y cuando se seca se contrae, lo que propicia la formación de grietas de 1 cm o más de grueso y más de 50 cm de profundidad. Este proceso da como resultado la mezcla continua de materiales de las capas superiores con los de las inferiores, lo que impide la formación de otros horizontes.

La textura que presentan es de migajón arcilloso o de arcilla, con estructura masiva y agregados estructurales en forma de cuña, son de colores pardo rojizo y en algunos casos gris rojizo, de ligera a moderadamente alcalinos, y en algunos casos a medida que aumenta la profundidad aumenta el contenido de sales en forma moderada, así como el sodio, pues su potencial de adsorción es alto.

La fertilidad natural de estos suelos es alta, pero el elevado contenido de arcilla expansible impone limitantes para su utilización agrícola, ocasionando que tengan un drenaje interno lento y se produzcan encharcamientos si están muy mojados, como

también que sean difíciles de manejar por ser extremadamente duros, si están secos. Cuando su manejo es adecuado se obtienen rendimientos altos.

Xerosol y Yermosol: Estos tipos de suelos son característicos de zonas áridas, tienen una capa superficial llamada horizonte *a*, *ocríco*, de colores claros, pardo rojizo y pardo claro, cuyo porcentaje de materia orgánica es bajo a muy bajo (de 1.2 a 1.5 % para *xerosoles* y de 0.1 a 0.5 % para *yermosoles*). Además en ellos se efectúa un proceso de acumulación de arcilla en las capas sub-superficiales, dando origen a un horizonte *b*, que cuando el contenido de dicho material es mínimo, es denominado *b*, *cambico*, pero al incrementarse ese contenido recibe el nombre de *b*, *argílico*. En algunos casos se encuentran acumulaciones de carbonatos de calcio o cristales de yeso.

En general son moderadamente alcalinos, con pH entre 7.9 y 8.3; pero en suelos que presentan fase salina, sódica o salina/sódica, el pH sube de 8.4 hasta 9.3. Las texturas de estos suelos son de migajones arenosos en la superficie y de migajones arcillosos o arcilla en los horizontes subsuperficiales, por lo que su potencial para absorber iones va de moderada a alta, siendo mas baja en los *yermosoles*. La saturación de bases es mayor de 50%, predominando el calcio sobre el potasio, su fertilidad es alta cuando se dispone de agua para riego, como sucede en el área cubierta por este estudio. En las zonas que no están dedicadas a esta actividad la vegetación que se desarrolla es de matorral sarcocaulé y mezquital. Ocupan la mayor área de distribución dentro del acuífero en la parte central, al este y noroeste.

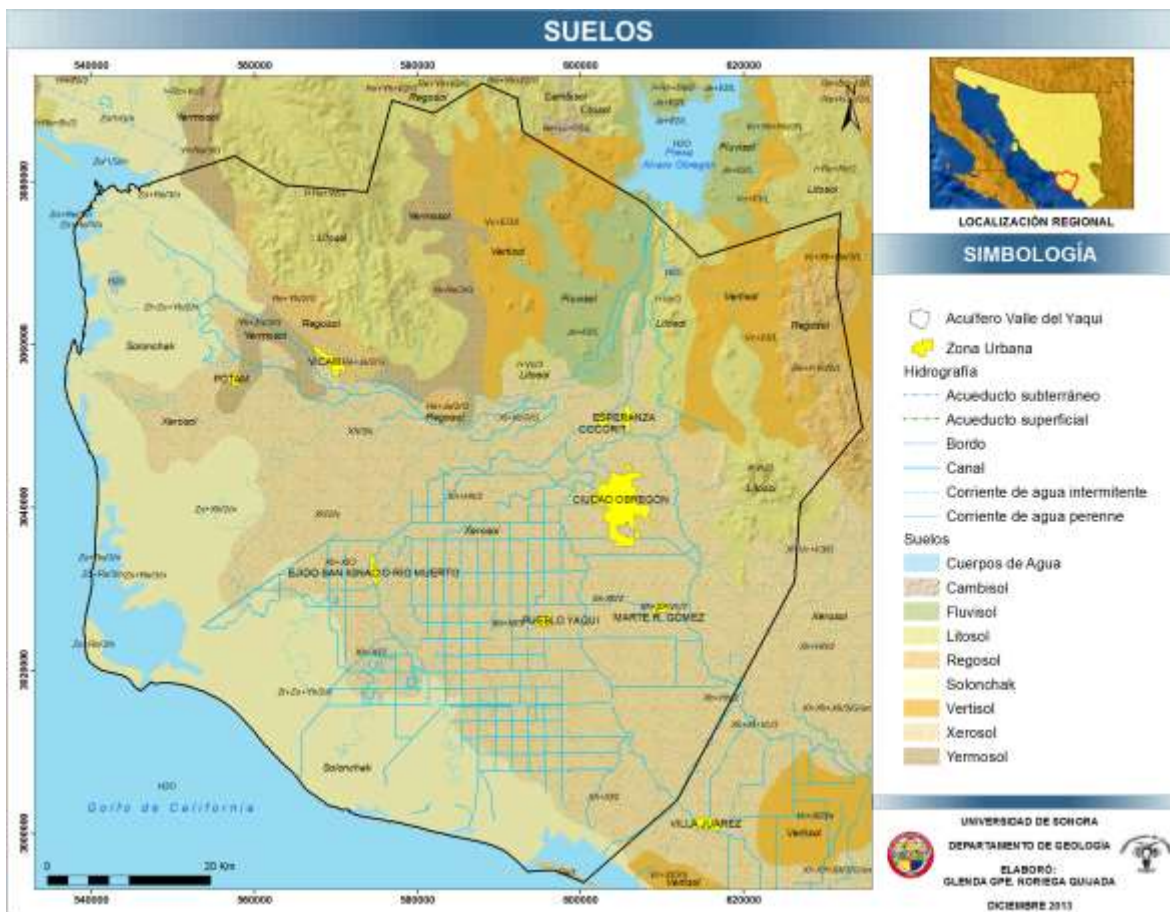


Figura 6. Tipos de suelos en el acuífero Valle del Yaqui (INEGI, 2007).

3.6 Vegetación

La vegetación de nuestro país es sumamente heterogénea. El Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2005) utiliza un sistema de clasificación jerárquica que considera en su nivel más alto las formaciones que son categorías vegetales caracterizadas principalmente por rasgos fisonómicos y ecológicos (bosque, selva, matorral, etc.), dentro de las cuales se incluyen los tipos de comunidad que se definen por sus rasgos fisonómicos, ecológicos y florísticos (chaparral, rosetófilo, sarcocaula, mesófilo de montaña, etc.) y los tipos de vegetación que combinan el nombre de la formación y el tipo de comunidad (bosque mesófilo de montaña, matorral sarcocaula, etc.). Los tipos de vegetación distribuidos en el área de estudio se describen a continuación (Figura 7):

Manglar. Es una especie de selva uniforme que puede alcanzar los 25 m de altura. El árbol más frecuente es el mangle rojo, árbol bien conocido por sus raíces aéreas en forma

de zancos. Los manglares se localizan en las orillas bajas y fangosas de las costas y alcanzan su mejor desarrollo en los esteros o lagunas costeras y en los estuarios de los ríos bajo influencia de agua salobre. En el acuífero se localizan hacia la parte oeste a lo largo de toda la línea de costa.

Mezquital. Vegetación dominada por árboles espinosos, principalmente mezquites (Prosopis). Se le encuentra en climas más bien áridos. Estos árboles permanecen verdes durante la temporada seca, ya que emplean las aguas subterráneas mediante sus largas raíces. Por esta razón crecen en suelos profundos y planos, lo que ha resultado en una fuerte destrucción de su hábitat, muy apto para la agricultura. Otros mezquiales están sujetos a una fuerte presión ganadera. En el acuífero se extiende desde la parte central hacia el oeste y norte y en algunas zonas del este.

Pastizal natural. Vegetación dominada por herbáceas, principalmente gramíneas (pastos, zacates o graminoides). Se le encuentra en cualquier clima, pero principalmente en las regiones semiáridas del norte y en las partes más altas de las montañas (por arriba de los 4000 metros). Casi todos los pastizales de nuestro país se emplean para la producción ganadera, casi siempre con una intensidad excesiva. Se distribuye en pequeñas zonas hacia la parte este del acuífero.

Selva baja caducifolia. Vegetación dominada por árboles de diferentes especies de hoja caduca, que se desarrolla en ambientes cálidos con diferencias muy marcadas entre las temporadas de lluvias y de secas. Es una selva de menos de 15 m de altura media de los árboles altos. Esta vegetación frecuentemente está sujeta a la agricultura de roza, tumba y quema y a la ganadería extensiva. Estas actividades la degradan fuertemente, por lo que puede ser uno de los ecosistemas tropicales más amenazados del mundo. Abarca la parte noreste del acuífero.

Vegetación de dunas costeras. Las dunas costeras cuando son de arenas móviles carecen virtualmente de vegetación, pero ésta las va invadiendo y fijando al disminuir la movilidad de la arena. Este tipo de vegetación se localiza en algunas zonas en la línea de costa.



Figura 7. Tipos de vegetación en el acuífero Valle del Yaqui (INEGI, 2005).

Vegetación de galería. La vegetación en galería representa un ecosistema ubicado linealmente en ambas márgenes de toda corriente, sumamente variable en su estructura, tanto espacial como temporalmente, condicionado por las características hidrológicas y geomorfológicas. La vegetación de este tipo imprime en gran medida las características ecológicas y de productividad acuática; su conservación permitirá, además de mantener un equilibrio hidrológico-geomorfológico-ecológico, el mantenimiento de la producción de organismos acuáticos, así como de áreas de afloración de aguas subterráneas y de recarga de acuíferos, espacios de protección de fauna terrestre y acuática y zonas para la recreación y para la educación ambiental. Se distribuye principalmente en la parte norte del acuífero.

Vegetación halófila. La vegetación halófila es la característica de los suelos salinos. Relativamente pocas especies de plantas son halófilas, no más que el 2%. Se localiza en toda la franja costera del acuífero.

4. CLIMATOLOGÍA

4.1 Tipo de Clima

En el acuífero se presentan 5 tipos de climas (Figura 8), de acuerdo a la clasificación climática de Köppen modificada por García (1964):

BS1hw. Es un clima semiseco con régimen de lluvias en verano, el porcentaje de lluvias invernales se encuentra entre 5 y 10.2%. La temperatura media anual es mayor a los 18°C. Este clima solo se presenta en unas pequeñas zonas en la parte este del acuífero.

BSo(h´)hw. Se trata de un clima seco con régimen de lluvias en verano, de 5 a 10.2% son las lluvias en invierno. La temperatura media anual es mayor a los 22°C. Se distribuye en la parte noreste del acuífero.

BSoh´(h)w. Este clima se localiza en una zona al norte por fuera del acuífero, es seco con lluvias en verano y la temperatura media anual entre 18 y 22°C.

BSohw. Este tipo de clima seco a semicálido con régimen de lluvias en verano e invierno fresco. De 5 a 10.2% es el porcentaje de lluvia invernal y presenta una temperatura media anual mayor a los 18°C. Se presenta en una zona al norte del acuífero.

BW(h´)hw. Es el clima predominante en el acuífero se distribuye en toda la línea de costa. Es muy seco con lluvia invernal entre 5 y 10.2% y lluvias en verano. La temperatura media anual es mayor a los 22°C.

4.2 Análisis Climatológico

La información climatológica existente se recopiló en las oficinas de la Dirección Técnica del Organismo de Cuenca Noroeste de la Comisión Nacional del Agua, en Hermosillo, Sonora, así como también, de la página de internet smn.cna.gob.mx, en donde se encuentra la información climatológica por estación.

Dentro del acuífero Valle del Yaqui se encuentran varias estaciones climatológicas, pero para el análisis se utilizaron 16 estaciones, las cuales presentan datos completos de varios años consecutivos, en este caso el periodo considerado para el presente estudio es desde el año de 1968 hasta el 2008.

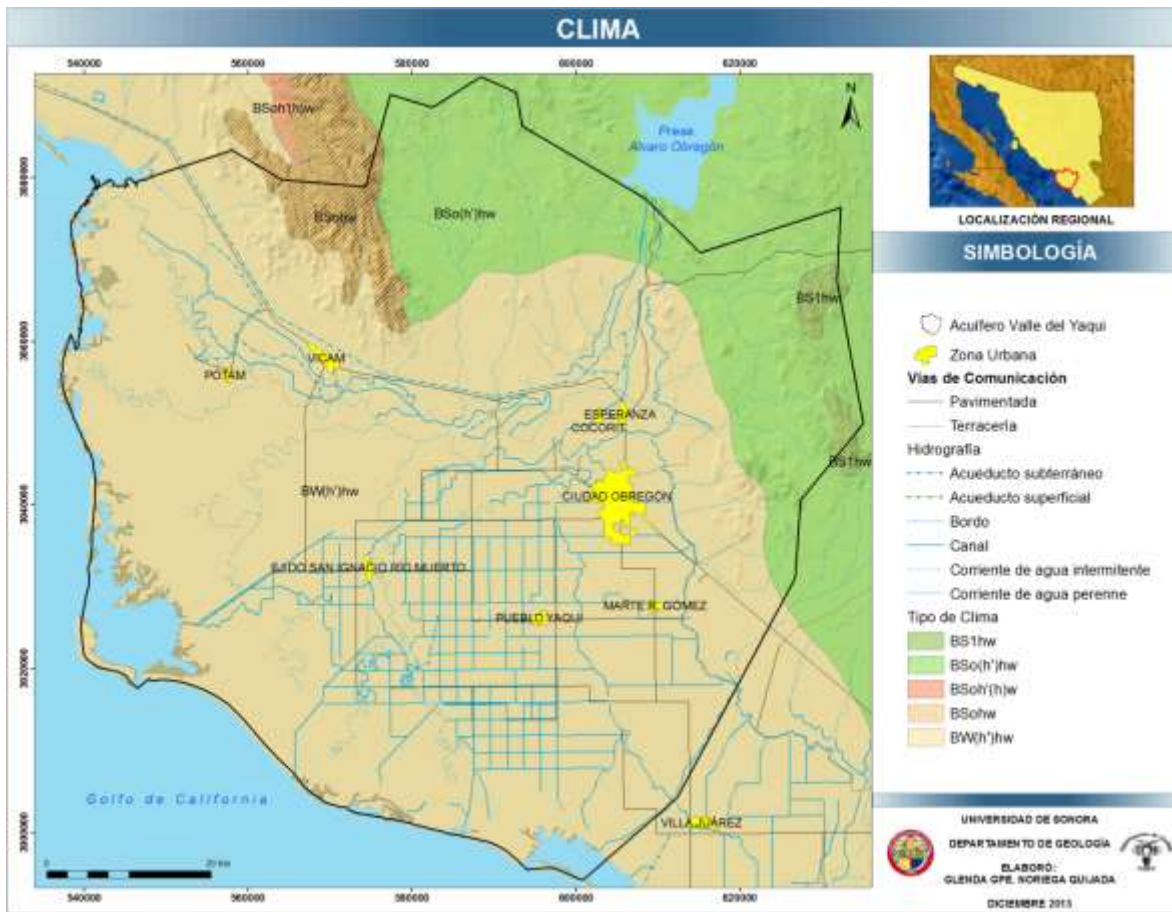


Figura 8. Tipos de climas en el acuífero Valle del Yaqui (modificado de García, 1964).

El análisis climatológico para el acuífero Valle del Yaqui se llevó a cabo considerando las precipitaciones y temperaturas medias mensuales y se calcularon las medias totales anuales, corregidas utilizando el factor de Thiessen. De igual forma, para la evapotranspiración real se utilizaron las fórmulas empíricas de Turc y Coutagne (Custodio y Llamas, 1997); se tomaron en cuenta los valores medios mensuales y anuales para cada estación.

En la Figura 9 se muestra el límite del acuífero, incluyendo las estaciones climatológicas que se utilizaron en el análisis de precipitación, temperatura y evapotranspiración, así como los Polígonos de Thiessen.

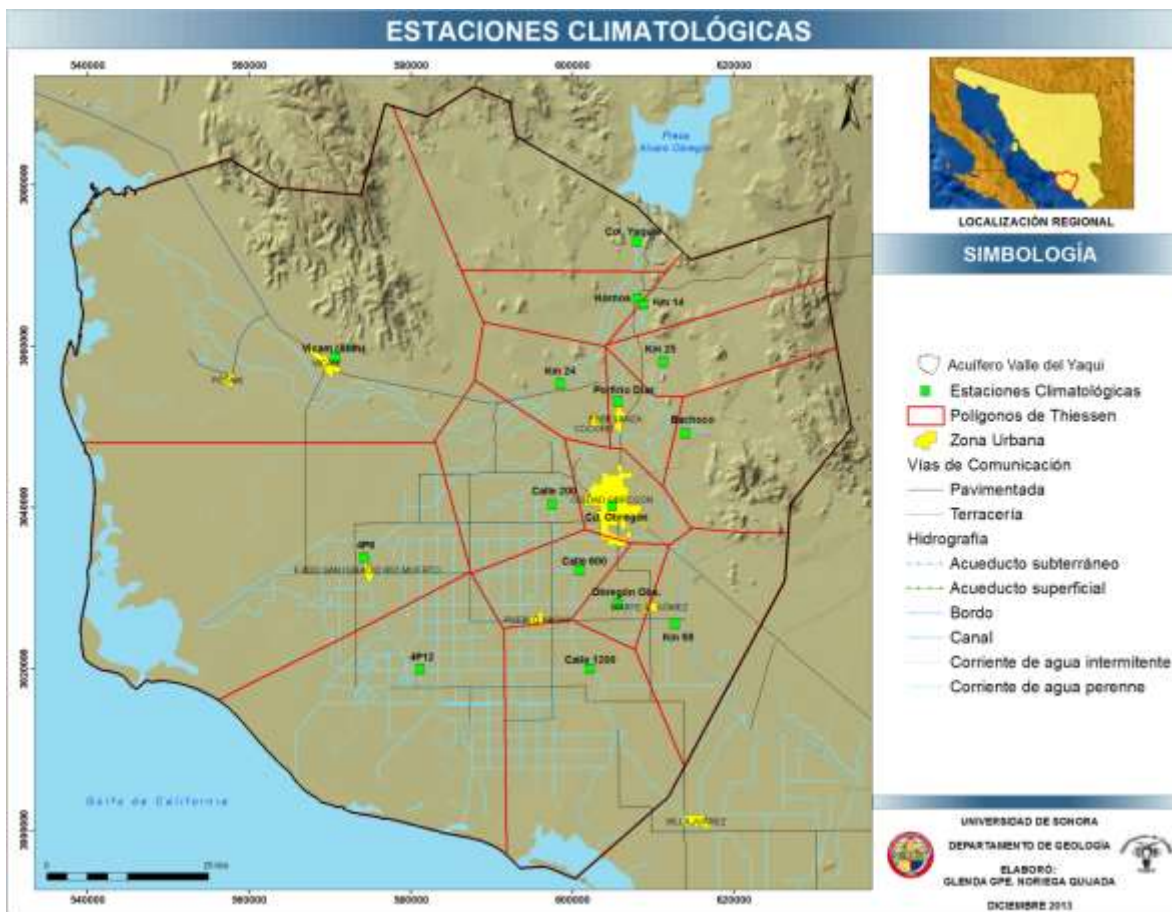


Figura 9. Estaciones climatológicas y Polígonos de Thiessen en el acuífero Valle del Yaqui.

4.2.1 Precipitación

Es el parámetro más importante dentro del ciclo hidrológico, ya que es el proceso mediante el cual se recibe el recurso en la superficie terrestre para convertirse en escurrimiento, evapotranspiración e infiltración al subsuelo. La precipitación media total calculada en función de los datos de las estaciones, considerando el factor de Thiessen, es de 329.33 mm. La precipitación máxima se calculó en la estación Km 25, con 474.61 mm y una mínima total de 255.02 mm en la estación 4P6 (Tabla 1).

Tabla 1. Precipitación media anual en el acuífero Valle del Yaqui.

ESTACIÓN	ÁREA (Km ²)	FACTOR THIESEN	PRECIPITACIÓN TOTAL (mm)	PRECIPITACIÓN MEDIA (mm)
4P6	1190.96	0.18	255.02	46.05
4P12	733.68	0.11	276.3	30.74
Bachoco	361.56	0.05	445.3	24.41
Calle 200	278.45	0.04	284.47	12.01
Calle 600	137.64	0.02	312.28	6.52
Calle 1200	531.01	0.08	325.77	26.23
Cd. Obregón	124.94	0.02	380.3	7.20
Col. Yaquis	442.66	0.07	413.63	27.76
Hornos	162.04	0.02	416.57	10.23
Km 14	179.29	0.03	404.19	10.99
Km 24	172.75	0.03	380.2	9.96
Km 25	220.69	0.03	474.61	15.88
Km 68	315.58	0.05	320.65	15.34
Obregón Obs.	82.64	0.01	319.8	4.01
Porfirio Díaz	86.64	0.01	371.64	4.88
Vícam (SMN)	1574.65	0.24	322.95	77.11
TOTAL	6595.18			329.33

Si bien el régimen pluvial en esta cuenca es variable, de manera general se puede decir que presenta dos períodos de ocurrencia principales: los meses de julio y agosto, que coinciden con la época del monzón mexicano; y el de los meses de diciembre y enero, que coinciden con la denominada temporada de equipatas de invierno.

4.2.2 Temperatura

La temperatura media anual corregida utilizando el factor de Thiessen, es de 23.95°C. La máxima se calculó en la estación Km 14, con 25.01°C; mientras que la mínima alcanza los 23.46°C en la estación de Vícam. En la Tabla 2 se presenta la temperatura media anual para el acuífero Valle del Yaqui corregida utilizando el factor de Thiessen.

Tabla 2. Temperatura media anual en el acuífero Valle del Yaqui.

ESTACIÓN	ÁREA (Km ²)	FACTOR THIESSEN	TEMPERATURA TOTAL (mm)	TEMPERATURA MEDIA (mm)
4P6	1190.96	0.18	23.59	4.26
4P12	733.68	0.11	24	2.67
Bachoco	361.56	0.05	24.3	1.33
Calle 200	278.45	0.04	24.64	1.04
Calle 600	137.64	0.02	23.9	0.50
Calle 1200	531.01	0.08	23.84	1.92
Cd. Obregón	124.94	0.02	24.9	0.47
Col. Yaquis	442.66	0.07	24.68	1.66
Hornos	162.04	0.02	24.1	0.59
Km 14	179.29	0.03	25.01	0.68
Km 24	172.75	0.03	24.02	0.63
Km 25	220.69	0.03	24.43	0.82
Km 68	315.58	0.05	24.11	1.15
Obregón Obs.	82.64	0.01	23.9	0.30
Porfirio Díaz	86.64	0.01	24.8	0.33
Vícam (SMN)	1574.65	0.24	23.46	5.60
TOTAL	6595.18			23.95

4.2.3 Evapotranspiración

La evaporación es el proceso mediante el cual el agua cambia del estado líquido al gaseoso debido a la radiación solar; se estima que en este proceso del ciclo hidrológico, entre el 75 y 90 % de la precipitación total anual que ocurre sobre los continentes retorna a la atmósfera en forma de vapor. La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa, junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación y se calcula mediante diferentes fórmulas empíricas. En el área de estudio, la evapotranspiración obtenida representa en promedio el 95 % de la precipitación y fue calculada por la fórmula de Turc para cada estación climatológica. La ecuación empírica de Turc establece lo siguiente:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

Dónde:

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

ETR=Evapotranspiración real anual (mm)

P=Precipitación media anual (mm)

T=Temperatura media anual (°C)

Los valores calculados, fueron corregidos utilizando el respectivo factor de Thiessen, obteniendo una máxima evapotranspiración de 484.08 mm en la estación Km 25 y una mínima de 266.04 mm en la 4P6 (Tabla 3).

Tabla 3. Evapotranspiración media anual en el acuífero Valle del Yaqui.

ESTACIÓN	ÁREA (Km ²)	FACTOR THIESSEN	ETR TOTAL (mm)	ETR MEDIA (mm)
4P6	1190.96	0.18	266.04	48.04
4P12	733.68	0.11	287.72	32.01
Bachoco	361.56	0.05	455.66	24.98
Calle 200	278.45	0.04	296.35	12.51
Calle 600	137.64	0.02	324.75	6.78
Calle 1200	531.01	0.08	337.32	27.16
Cd. Obregón	124.94	0.02	393.55	7.46
Col. Yaquis	442.66	0.07	425.26	28.54
Hornos	162.04	0.02	427.72	10.51
Km 14	179.29	0.03	417.33	11.35
Km 24	172.75	0.03	391.95	10.27
Km 25	220.69	0.03	484.08	16.20
Km 68	315.58	0.05	332.84	15.93
Obregón Obs.	82.64	0.01	331.66	4.16
Porfirio Díaz	86.64	0.01	385.64	5.07
Vícam (SMN)	1574.65	0.24	334.55	79.88
TOTAL	6595.18			340.82

4.3 Climodiagramas

Se realizaron los climodiagramas de Walter y Gausson con los datos de precipitación y temperatura para cada una de las estaciones climatológicas para un periodo consecutivo de casi 40 años en algunas estaciones, y en otras varía ya que no todas presentaban datos constantes. Cuando la precipitación es inferior a 2 veces la temperatura media en °C el mes se considera árido, si la precipitación es superior a este valor, el mes se considera semihúmedo y húmedo si la precipitación supera en tres veces a la temperatura media mensual.

En las figuras 10, 11, 12, 13 y 14 se observan los climodiagramas para las estaciones 4P-6, 4P-12, Calle 200, Calle 1200, Km 25, Km 68, Vícam, Km 24, Colonia Yaquis y Obregón

Obs. En todas se puede observar que los meses de mayor aridez corresponden a marzo, abril, mayo y junio. En la mayoría de las estaciones es en el mes de julio cuando se comienza a recuperar por la presencia de las primeras lluvias y agosto y septiembre son los meses considerados como semihúmedos.

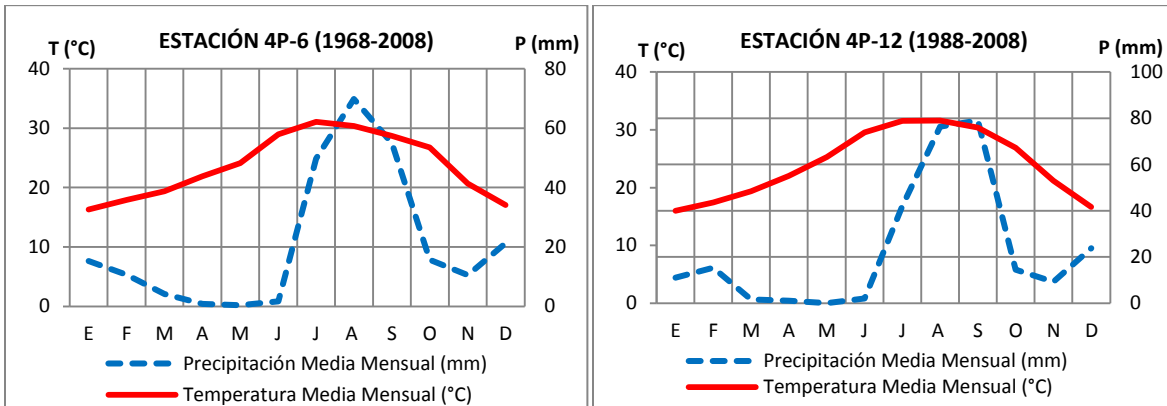


Figura 10. Climodiagramas de las estaciones 4P-6 y 4P-12.

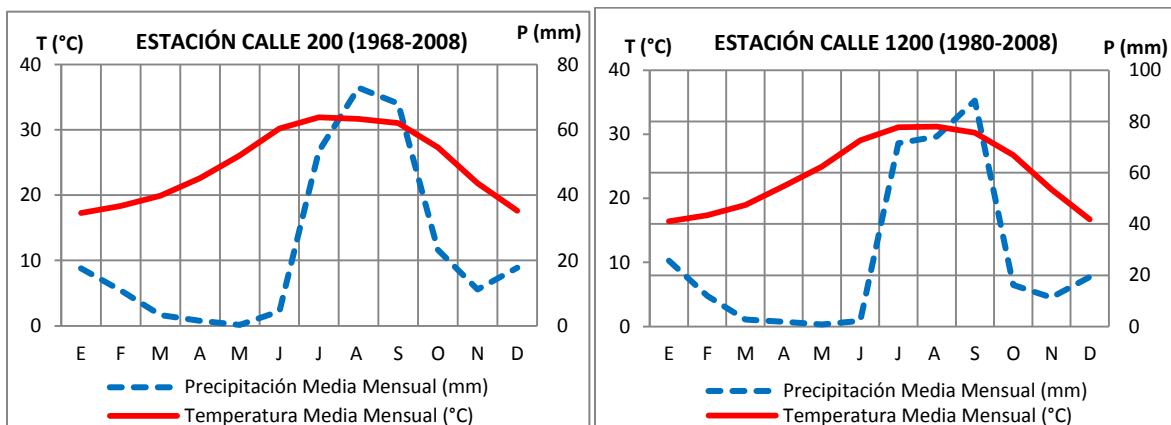


Figura 11. Climodiagramas de las estaciones Calle 200 y Calle 1200.

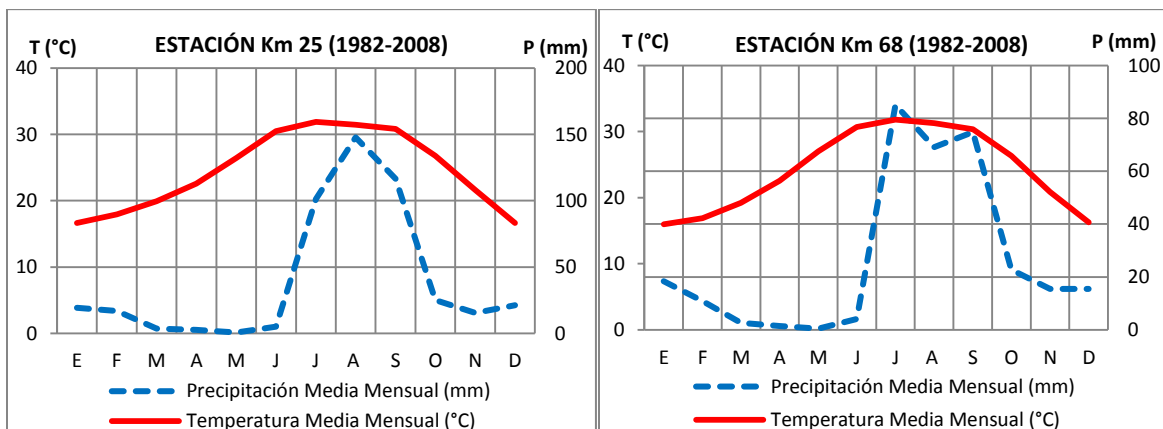


Figura 12. Climodiagramas de las estaciones Km 25 y Km 68.

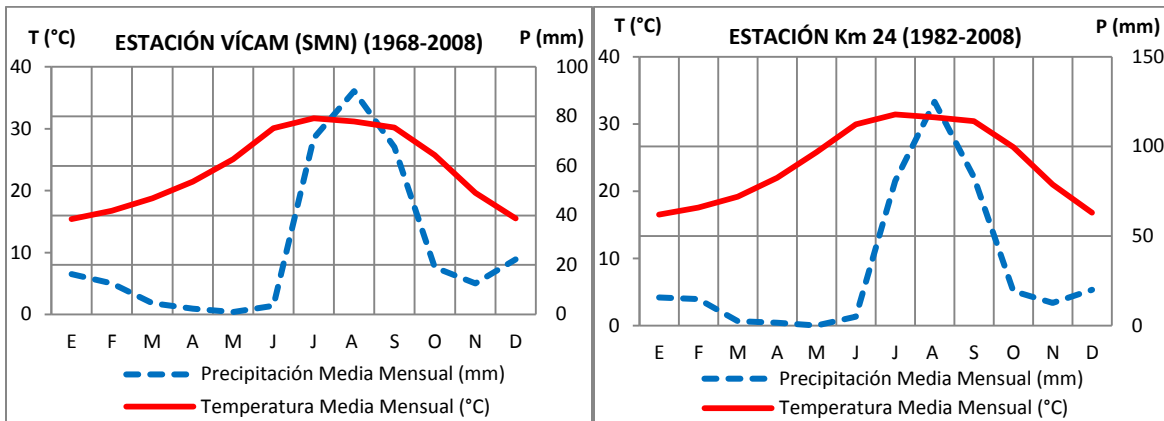


Figura 13. Climodiagramas de las estaciones VÍcam (SMN) y Km 24.

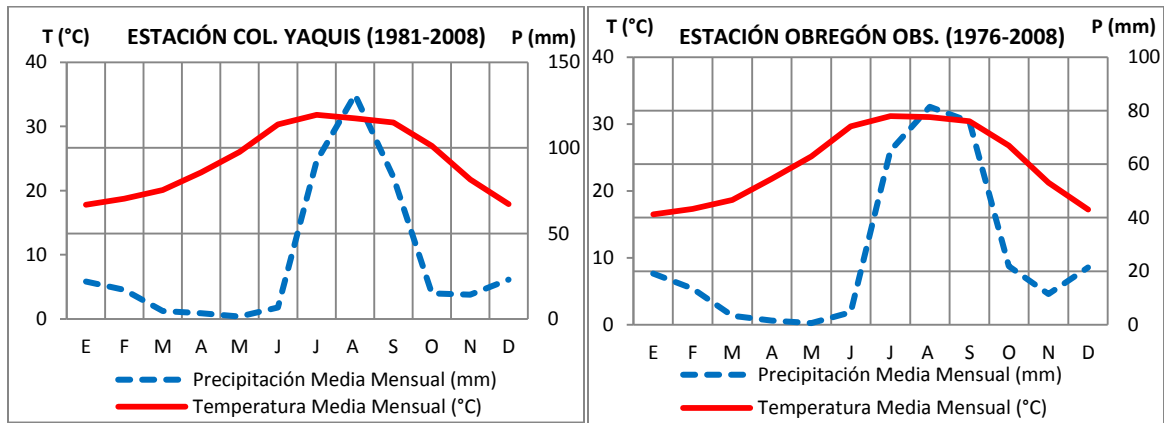


Figura 14. Climodiagramas de las estaciones Colonia Yaquis y Obregón Obs.

4.4 Índices Climatológicos

4.4.1 Índice de Aridez de Martonne

Los índices de aridez miden el grado de aridez o de sequía de un clima, por lo que están muy relacionados con los índices de precipitaciones. Los índices de aridez basados en datos climáticos, tienen como base el principio de que con la temperatura aumenta la evapotranspiración (Capel-Molina, 1982) y por lo tanto, las precipitaciones se vuelven menos efectivas, que es ya un indicativo de menor potencial de infiltración de recarga al subsuelo.

Por su parte el Índice de Martonne (1926) permite una primera identificación fitoclimática del mundo, aunque es especialmente efectivo en zonas tropicales y subtropicales. Puede calcularse el índice anual o el mensual con la fórmula:

$$I_a = \frac{P}{t_m + 10}$$

Donde:

P=Precipitación media anual (mm)

t_m=Temperatura media anual (°C)

Los resultados se comparan con la tabla 4.

Tabla 4. Clasificación del Índice de Martonne (1926).

Índice	Ambiente Fitoclimático
De 0 a 5	Ambiente Desértico, árido extremo.
de 5 a 10	Ambiente Semidesértico, árido. Estepa desierta con posibilidad de cultivos de riego
de 10 a 20	Ambiente semiárido, vegetación de estepa y mediterránea de bosque esclerófilo. Zonas de transición con escorrentías temporales
de 20 a 30	Vegetación sub-húmeda de bosque y pradera. Escorrentía continua con posibilidad de cultivo de riego
de 30 a 40	Vegetación húmeda. Escorrentía fuerte y continua que permite bosque
> 40	Vegetación hiperhúmeda. Exceso de escorrentía

En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos del Índice de Martonne en donde se observa que en el área de estudio, la mitad de las estaciones se clasifican dentro de ambiente *semidesértico, árido*, y corresponde a las estaciones que se localizan de la parte central del acuífero hacia la línea de costa. El resto es ambiente de tipo *semiárido* para las estaciones localizadas en la parte norte y este del área de estudio.

Tabla 5. Clasificación del Índice de Martonne en el área de estudio.

ESTACIÓN	PP (mm)	T (°C)	I _a	VALOR DE I _a	AMBIENTE
4P-6	255.02	23.59	7.59	5 -- 10	Semidesértico, Árido
4P-12	276.3	24	8.13	5 -- 10	Semidesértico, Árido
Bachoco	445.3	24.3	12.98	10 -- 20	Semiárido
Calle 200	284.47	24.64	8.21	5 -- 10	Semidesértico, Árido
Calle 600	312.28	23.9	9.21	5 -- 10	Semidesértico, Árido
Calle 1200	325.77	23.84	9.63	5 -- 10	Semidesértico, Árido
Cd. Obregón	380.3	24.9	10.90	10 -- 20	Semiárido
Col. Yaquis	413.63	24.68	11.93	10 -- 20	Semiárido
Hornos	416.57	24.1	12.22	10 -- 20	Semiárido

Km 14	404.19	25.01	11.54	10 -- 20	Semiárido
Km 25	474.61	24.43	13.78	10 -- 20	Semiárido
Km 68	320.65	24.11	9.40	5 -- 10	Semidesértico, Árido
Km 24	380.38	24.02	11.18	10 -- 20	Semiárido
Obregón Obs.	319.8	23.9	9.43	5 -- 10	Semidesértico, Árido
Porfirio Díaz	371.64	24.8	10.68	10 -- 20	Semiárido
Vícam (SMN)	322.95	23.46	9.65	5 -- 10	Semidesértico, Árido

4.4.2 Índice de Erosión Potencial de Fournier

El Índice de Erosión Potencial de Fournier (1960) calcula la erosión en función de las precipitaciones con la fórmula:

$$K = \frac{\sum Pi^2}{P}$$

Donde:

Pi=Precipitación media mensual

P=Precipitación media anual

Los resultados de la aplicación de esta ecuación se comparan con la Tabla 6 y en la Tabla 7 se muestra que la clasificación obtenida para el Índice de Erosión Potencial de Fournier corresponde a zonas que varían de *muy baja* a *baja* erosión, sólo en una se presenta moderada. La clasificación de muy baja corresponde a estaciones localizadas en la parte central y hacia la línea de costa y las de baja se ubican en la porción norte y este del área de estudio.

Tabla 6. Clasificación del Índice de Fournier (1960).

CLASE	1	2	3	4	5
VALOR DE K	<60	60-90	90-120	120-160	>160
DESCRIPCIÓN	Muy baja	Baja	Moderada	Alta	Muy alta

Tabla 7. Clasificación del Índice de Fournier en el área de estudio.

ESTACIÓN	R=	CLASE	K	DESCRIPCIÓN
4P-6	45.26	1	< 60	MUY BAJA
4P-12	54.61	1	< 60	MUY BAJA
Bachoco	86.44	2	60-90	BAJA
Calle 200	50.02	1	< 60	MUY BAJA
Calle 600	52.99	1	< 60	MUY BAJA
Calle 1200	61.29	2	60-90	BAJA
Cd. Obregón	68.17	2	60-90	BAJA
Col. Yaquis	83.13	2	60-90	BAJA
Hornos	77.62	2	60-90	BAJA
Km-14	82.20	2	60-90	BAJA
Km-25	100.37	3	90-120	MODERADA
Km-68	59.52	1	< 60	MUY BAJA
Km 24	79.98	2	60-90	BAJA
Obregón Obs.	57.13	1	< 60	MUY BAJA
Porfirio Díaz	74.79	2	60-90	BAJA
Vícam (SMN)	59.62	1	< 60	MUY BAJA

4.4.3 Aplicación de la Metodología Utilizada

Los cambios climáticos tienen como resultado largos periodos de sequías y regímenes irregulares de lluvias, que combinados con las prácticas agrícolas insostenibles y el manejo ineficiente del agua, pueden inducir el fenómeno de la desertificación. Las sequías que son seguidas por intensas tormentas lavan y acarrean grandes cantidades de tierra y exponen el suelo a la erosión, dejándolo además con poca cubierta vegetal.

Con base en los resultados obtenidos, el presente trabajo aplica la metodología desarrollada en el proyecto DISMED (Desertification Information System for the Mediterranean, 2008), que es un proyecto desarrollado en las regiones del este y centro de Europa. Con este método se obtiene la sensibilidad a la desertificación y la sequía, que se encuentran definidas por un índice (ISD: Índice de Sensibilidad a la Desertificación) con el que se obtiene la media geométrica de tres índices: calidad de suelo, clima y vegetación. La metodología DISMED únicamente toma en cuenta factores causales como son las propiedades del suelo, clima y vegetación, mientras que los indicadores socioeconómicos no están incluidos. La metodología esta basada en datos obtenidos de:

- ❖ CLC (Corinne Land Cover) 2000 datos basados en el uso y cubierta del suelo.
- ❖ Información climatológica de 16 de las estaciones existentes en el área de estudio.

- ❖ Conjunto de Datos Vectorial Edafológico y de Vegetación, Escala 1:250 000 de INEGI 2007.

4.4.3.1 Índice de Calidad del Clima (ICC)

Como primer paso, los aspectos climáticos son analizados a través del Índice de Aridez (IA), usando la metodología desarrollada por FMA (Applied Meteorological Foundation, 2009) con la siguiente ecuación:

$$IA = \frac{P}{ETP}$$

Donde:

IA=Índice de aridez

P=Precipitación media anual

ETP=Evapotranspiración potencial media anual

Con este índice, bajo análisis el territorio se clasifica con jerarquías definidas, como se observa en la Tabla 8. Para el análisis de este índice aplicado al área de estudio, se realizó para cuatro periodos distintos, tres de 10 años y el último de 8 años, con la finalidad de observar las variaciones de la aridez.

Tabla 8. Rangos de clasificación del Índice de Calidad del Clima (FMA, 2009).

ICC	ZONAS CLIMÁTICAS	CLASIFICACIÓN
< 0.05	Hiper-árido	2
0.05 - 0.20	Árido	1.75
0.20 - 0.50	Semiárido	1.5
0.50 - 0.65	Subhúmedo seco	1.25
> 0.65	Húmedo	1

Los cálculos y resultados aplicados para los cuatro periodos citados, se muestran en las Tablas 9, 10, 11 y 12, en donde se puede observar que en todos los periodos el índice de calidad de clima es >0.65, que corresponden con a la zona climática húmeda y se le da como clasificación 1.

Tabla 9. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 1970-1980, Valle del Yaqui, Sonora.

1970 - 1980									
ESTACIÓN	X	Y	PP (mm)	TMP (°C)	ETR(mm)	IA	ICC	ZONA	CLASIF.
4P-6	574268	3033795	232.62	23.04	241.93	0.962	>0.65	Húmeda	1
Calle 200	597500	3040420	243.79	24.22	253.79	0.961	>0.65	Húmeda	1
Calle 600	600833	3032261	315.59	23.74	325.37	0.970	>0.65	Húmeda	1
Cd. Obregón	604912	3040204	360.36	24.61	370.28	0.973	>0.65	Húmeda	1
Hornos	608033	3065897	356.78	23.57	365.39	0.976	>0.65	Húmeda	1
Porfirio Díaz	605569	3053166	238.63	24.34	248.59	0.960	>0.65	Húmeda	1
Vícam	570692	3058637	263.25	23.02	272.77	0.965	>0.65	Húmeda	1

Tabla 10. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 1980-1990, Valle del Yaqui, Sonora.

1980-1990									
ESTACIÓN	X	Y	PP (mm)	TMP (°C)	ETR(mm)	IA	ICC	ZONA	CLASIF.
4P-6	574268	3033795	285.53	23.65	295.48	0.966	>0.65	Húmeda	1
Calle 200	597500	3040420	308.2	24.81	318.99	0.966	>0.65	Húmeda	1
Calle 600	600833	3032261	297.15	23.42	306.84	0.968	>0.65	Húmeda	1
Calle 1200	602087	3020085	334.34	23.22	343.16	0.974	>0.65	Húmeda	1
Cd. Obregón	604912	3040204	409.85	24.27	417.46	0.982	>0.65	Húmeda	1
Col. Yaquis	607943	3072944	427.10	24.45	434.18	0.984	>0.65	Húmeda	1
Hornos	608033	3065897	470.17	24.17	473.67	0.993	>0.65	Húmeda	1
Obregón Obs.	605614	3028091	322.79	23.70	332.42	0.971	>0.65	Húmeda	1
Porfirio Díaz	605569	3053166	409.95	25.75	420.15	0.976	>0.65	Húmeda	1
Vícam	570692	3058637	303.62	23.81	313.59	0.968	>0.65	Húmeda	1

Tabla 11. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 1990-2000, Valle del Yaqui, Sonora.

1990-2000									
ESTACIÓN	X	Y	PP (mm)	TMP (°C)	ETR(mm)	IA	ICC	ZONA	CLASIF.
4P-6	574268	3033795	255.26	23.67	265.13	0.963	>0.65	Húmeda	1
4P-12	581113	3019991	275.57	23.78	285.6	0.965	>0.65	Húmeda	1
Bachoco	613941	3049179	432.16	24.42	438.9	0.985	>0.65	Húmeda	1
Calle 200	597500	3040420	296.1	24.99	307.01	0.964	>0.65	Húmeda	1
Calle 600	600833	3032261	311.52	24.26	321.83	0.968	>0.65	Húmeda	1
Calle 1200	602087	3020085	322.45	23.85	332.24	0.971	>0.65	Húmeda	1
Cd. Obregón	604912	3040204	376.25	25.19	386.86	0.973	>0.65	Húmeda	1
Col. Yaquis	607943	3072944	438.36	24.60	445.13	0.985	>0.65	Húmeda	1
Hornos	608033	3065897	431.96	24.33	438.50	0.985	>0.65	Húmeda	1

Km 14	608806	3065196	382.70	25.30	393.00	0.974	>0.65	Húmeda	1
Km 25	611178	3058053	494.06	24.44	496.38	0.995	>0.65	Húmeda	1
Km 68	612659	3025606	256.06	25.01	266.60	0.960	>0.65	Húmeda	1
Km 24	598450	3055383	371.06	23.92	379.71	0.977	>0.65	Húmeda	1
Obregón Obs.	605614	3028091	352.81	23.89	361.99	0.975	>0.65	Húmeda	1
Porfirio Díaz	605569	3053166	449.03	24.70	455.39	0.986	>0.65	Húmeda	1
Vícam	570692	3058637	338.68	23.60	347.86	0.974	>0.65	Húmeda	1

Tabla 12. Obtención del Índice de Calidad de Clima para el periodo 2000-2008, Valle del Yaqui, Sonora.

2000-2008									
ESTACIÓN	X	Y	PP (mm)	TMP (°C)	ETR(mm)	IA	ICC	ZONA	CLASIF.
4P-6	574268	3033795	253.97	24.36	264.17	0.961	>0.65	Húmeda	1
4P-12	581113	3019991	250.49	24.06	260.5	0.962	>0.65	Húmeda	1
Bachoco	613941	3049179	463.11	24.20	467.24	0.991	>0.65	Húmeda	1
Calle 200	597500	3040420	261.8	24.79	272.32	0.961	>0.65	Húmeda	1
Calle 600	600833	3032261	306.81	24.54	317.38	0.967	>0.65	Húmeda	1
Calle 1200	602087	3020085	340.14	24.29	350.11	0.972	>0.65	Húmeda	1
Cd. Obregón	604912	3040204	370.57	25.67	381.6	0.971	>0.65	Húmeda	1
Col. Yaquis	607943	3072944	358.69	25.02	369.16	0.972	>0.65	Húmeda	1
Hornos	608033	3065897	409.31	24.55	417.47	0.980	>0.65	Húmeda	1
Km 14	608806	3065196	409.13	24.88	417.91	0.979	>0.65	Húmeda	1
Km 25	611178	3058053	441.71	24.52	448.10	0.986	>0.65	Húmeda	1
Km 68	612659	3025606	326.68	24.17	336.73	0.970	>0.65	Húmeda	1
Km 24	598450	3055383	370.03	24.48	379.54	0.975	>0.65	Húmeda	1
Obregón Obs.	605614	3028091	337.42	24.29	347.43	0.971	>0.65	Húmeda	1
Porfirio Díaz	605569	3053166	396.63	24.45	405.17	0.979	>0.65	Húmeda	1
Vícam	570692	3058637	312.70	23.56	322.34	0.970	>0.65	Húmeda	1

En la Figura 15 se muestran las configuraciones realizadas para los cuatro periodos en donde en el transcurso de los años se observan pequeñas variaciones en la aridez. Para todos los periodos se tienen las zonas más áridas hacia la parte central del acuífero y hacia la línea de costa y va disminuyendo hacia las zonas serranas del este y cercanas a la presa Álvaro Obregón, correspondiendo principalmente a las zonas de recarga del acuífero y al cauce principal del río Yaqui.

ÍNDICE DE ARIDEZ (IA)

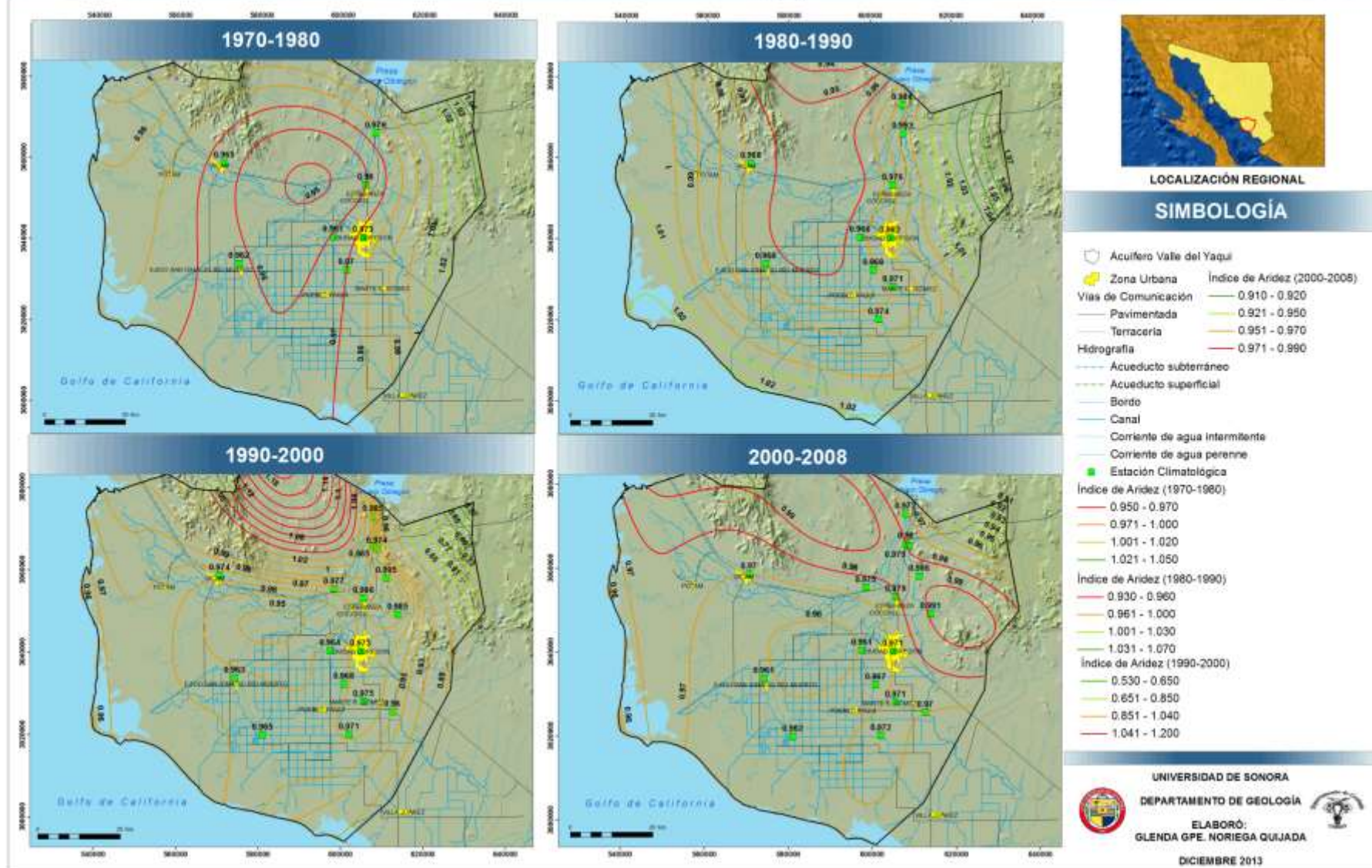


Figura 15. Distribución del Índice de Aridez para los cuatro periodos analizados en el área de estudio.

4.4.3.2 Índice de Calidad del Suelo (ICS)

El Índice de Calidad del Suelo (ICS), fue desarrollado por Sahara and Sahel Observatory, (OSS, 2009), el índice está basado en cuatro parámetros: material de origen, profundidad del suelo, textura y pendiente. El ICS está dado por la media geométrica de los índices de los cuatro parámetros.

$$ICS = (PM * D * T * S)^{1/4}$$

Donde:

PM=Material de origen del suelo

D=Profundidad del suelo

T=Textura del suelo

S=Pendiente del suelo

El material de origen es clasificado de acuerdo a tres clasificaciones como se observa en Tabla 13.

Tabla 13. Clasificación del suelo de acuerdo al material de origen (OSS, 2009).

MATERIAL DE ORIGEN	PUNTUACIÓN
Material de origen coherente: caliza, dolomías, arenisca, capa dura de caliza	1
Material de origen moderadamente coherente: Mármol-caliza, arenisca	1.5
Material de origen suave a duro: Arcilla calcárea, arcilla, formación arenosa, aluvión y coluvión	2

Para la profundidad del suelo se utiliza la siguiente clasificación de acuerdo al tipo de suelo presente (Tabla 14).

Tabla 14. Clasificación de acuerdo al tipo de suelo (OSS, 2009).

MATERIAL DE ORIGEN	PUNTUACIÓN
Fluvisoles	1
Todos los otros grupos	1.5
Leptosoles y regosoles	2

La textura del suelo fue agrupada en la Tabla 15.

Tabla 15. Clasificación de acuerdo a la textura del suelo (OSS, 2009).

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	PUNTUACIÓN
Textura no muy clara a media	arenosa-limosa, limosa-arenosa, balanceado	1
Textura delgada a media	arcillosa-limosa, arenosa-arcillosa, arcillosa-arenosa	1.33
Textura delgada a media	arcillosa, limosa-arcillosa	1.66
Textura gruesa	arenosa a muy arenosa	2

La siguiente clasificación es la propuesta con respecto a la pendiente (Tabla 16).

Tabla 16. Clasificación de acuerdo a la pendiente del suelo (OSS, 2009).

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	PUNTUACIÓN
a	Nivel (dominado por una pendiente con un rango de 0 a 8%)	1
b	Sloping (dominado por una pendiente con un rango de 8 a 15%)	1.33
c	Moderadamente empinado (dominado por una pendiente con un rango de 15 a 25%)	1.66
d	Empinado (dominado por una pendiente por arriba de 25%)	2

En la Tabla 17 se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros aplicados en el área de estudio, como son la clasificación y la puntuación, y en la última columna se muestra el ICS obtenido para cada una de las estaciones en donde se tiene que los valores varían de 0.75 a 1.5, predominando 0.998 en 13 estaciones.

En la Figura 16 se muestra la distribución cartográfica del Índice de Calidad de Suelo en el acuífero Valle del Yaqui, se observa que los valores de 0.998 se localizan en toda la parte central del acuífero y los valores de 1.5 hacia la parte topográficamente más alta, hacia el este del acuífero, en las estaciones Km 14 y Km 25. Estos resultados están relacionados con el tipo de suelo del que se trata, donde se tiene que los valores de 0.998

se encuentran en los xerosoles, el mas bajo de 0.75 en el fluvisol y los de 1.5 corresponden a litosoles.

Tabla 17. Obtención del Índice de Calidad de Suelo en el acuífero Valle del Yaqui.

ESTACIÓN	MATERIAL DE ORIGEN (PM)	PROF. SUELO (D)		TEXTURA DEL SUELO (T)		PENDIENTE DEL SUELO (S)		ÍNDICE DE CALIDAD DEL SUELO (ICS)
4P6	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
4P12	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Bachoco	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Calle 200	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Calle 600	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Calle 1200	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Cd. Obregón	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Col. Yaquis	1.5	Fluvisol	1	Gruesa	2	0 a 8%	1	0.75
Hornos	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Km 14	2	Litosol	1.5	Gruesa	2	0 a 8%	1	1.5
Km 24	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Km 25	2	Litosol	1.5	Gruesa	2	0 a 8%	1	1.5
Km 68	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Obregón Obs	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Porfirio Díaz	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998
Vícam (SMN)	2	Xerosol	1.5	Delgada a Media	1.33	0 a 8%	1	0.998

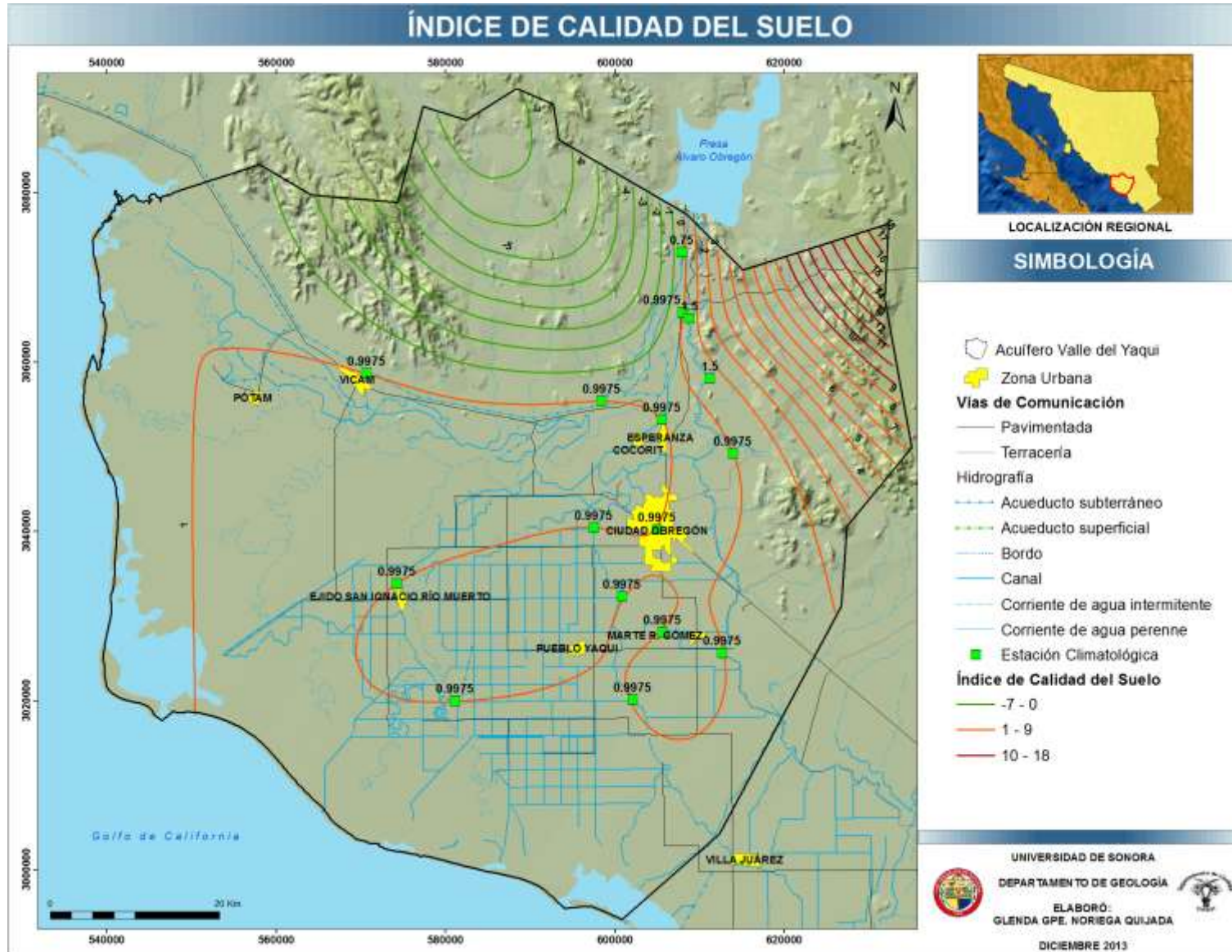


Figura 16. Distribución del Índice de Calidad del Suelo en el área de estudio.

4.4.3.3 Índice de Calidad de Vegetación (ICV)

Para la obtención del Índice de Calidad de Vegetación (ICV), se utilizó la clasificación de Corinne Land Cover (CLC90, CLC2000) con tres niveles de clasificación, asignando a cada clase de CLC un valor a cada uno de estos cuatro parámetros: protección a la erosión PE, resistencia a la sequía RS, cobertura de suelo CS, resistencia al fuego RF, usando el mismo rango de valores para los cuatro parámetros:

- ❖ 1 (buena)
- ❖ 1.5 (moderada)
- ❖ 2 (mala)

ICV esta dado por la media geométrica de los índices de los cuatro parámetros.

$$ICV = (PE * RS * CS * RF)^{1/4}$$

El riesgo por erosión depende de varios factores, como son el gradiente de la pendiente, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, la lluvia y la erosividad del viento. Para obtener este parámetro primero se realizó el cálculo de la erosión (**A**) en el área de estudio por medio de la ecuación (Tabla 18):

$$A = RKLSCP$$

Donde:

R= Factor erosividad de las lluvias a partir de la ecuación dada por Cortés (1991):
 $Y=3.45555X+0.006470X^2$ X= Precipitación media anual (mm)

K= Erosionabilidad del suelo

LS= Factor topográfico, que es en función de longitud, inclinación y forma de la pendiente

C= Cobertura vegetal

P= Factor de prácticas de conservación de la estructura del suelo

Posteriormente en base al resultado obtenido de erosión (A) en la Tabla 18 se realizó la clasificación para obtener la resistencia de la erosión como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 18. Obtención de la erosión en el área del acuífero Valle del Yaqui.

ESTACIÓN	PP (mm)	R	K	LS	CP	A	PE	CLASIF.
4P6	255.02	1302.14	0.3	1.66	0.4	259.39	>25	2
4P12	276.3	1448.85	0.3	1.66	0.4	288.61	>25	2
Bachoco	445.3	2822.1	0.3	1.66	0.001	1.41	<12	1
Calle 200	284.47	1506.74	0.3	1.66	0.4	300.14	>25	2
Calle 600	312.28	1710.24	0.3	1.66	0.4	340.68	>25	2
Calle 1200	325.77	1812.56	0.3	1.66	0.4	361.06	>25	2
Cd. Obregón	380.3	2250.18	0.3	1.66	0.4	448.24	>25	2
Col. Yaquis	413.63	2536.61	0.18	0.42	0.4	76.71	>25	2
Hornos	416.57	2562.57	0.3	1.66	0.4	510.46	>25	2
Km 14	404.19	2454.03	0.19	0.42	0.001	0.20	<12	1
Km 24	474.61	3097.89	0.3	1.66	0.001	1.54	>25	2
Km 25	320.65	1773.45	0.19	0.42	0.001	0.14	<12	1
Km 68	380.38	2250.85	0.3	1.66	0.4	448.37	>25	2
Obregón Obs	319.8	1766.99	0.3	1.66	0.4	351.98	>25	2
Porfirio Díaz	371.64	2178.11	0.3	1.66	0.4	433.88	>25	2
Vícam (SMN)	322.95	1790.98	0.3	1.66	0.001	0.89	<12	1

Tabla 19. Clasificación para la protección a la erosión (PE) (CLC, 2000).

DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN
< 12 T/ha año	1
12 - 25 T/ha año	1.5
> 25 T/ha año	2

La resistencia a la sequía (RS) se define como la capacidad de especies o comunidades de plantas para resistir el estrés hídrico que es una característica típica en ambientes áridos y semiáridos. Cinco diferentes clasificaciones son usadas para definir este parámetro correspondiendo a las capacidades de resistencia de las distintas comunidades vegetales como se muestra en la Tabla 20.

Tabla 20. Clasificación para la resistencia a la sequía (RS) (CLC, 2000).

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
5	Muy Alta (Mezcla de maquis mediterráneo/bosques de hojas perennes, maquis mediterráneo)
4	Alta (Coníferas, selva caducifolia, árboles de olivo)
3	Moderada (Cultivos de árboles polianuales como el vino, almendras y árboles frutales)
2	Baja (Prados polianuales)
1	Muy Baja (Cultivos anuales, prados anuales)

La cobertura vegetal es un factor clave en la degradación de la tierra. La reducción en la cobertura perene es considerada como un indicador importante del comienzo de la desertificación. La cobertura vegetal juega un papel importante en la protección de la superficie del suelo de la salpicadura de las gotas de lluvia, incremento de la materia orgánica, la estabilidad agregada del suelo, la capacidad de retención de agua, la conductividad hidráulica, el retardo y la reducción del escurrimiento superficial, etc. Muchos autores han demostrado que en un amplio rango de ambientes, el escurrimiento de agua y la pérdida de los sedimentos del suelo disminuyen exponencialmente cuando el porcentaje de cobertura vegetal incrementa. Para poder clasificar este parámetro se usa la Tabla 21.

Tabla 21. Clasificación para cobertura del suelo (CS) (CLC, 2000).

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	PUNTUACIÓN
<10%	Mala	2
10%-40%	Moderada	1.5
>40%	Buena	1

El riesgo por fuego esta determinado por la composición particular de la vegetación y por lo tanto su flamabilidad, su capacidad de combustión y su capacidad de recuperación después del fuego. El riesgo por fuego es estimado en base a los tipos de vegetación presentes, la cual es definida en base a la estructura y las especies dominantes como se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22. Clasificación para la resistencia al fuego (RF) (CLC, 2000).

CLASIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN
1	Baja(Tierra desnuda, cultivos polianuales, cultivos anuales como maíz, tabaco y girasol)
2	Moderada (Cultivos anuales como los cereales, robles caducifolios, mezcla de robles caducifolios y de hojas perennes, mezcla de maquis mediterráneo y bosques de hojas perennes)
3	Alta (maquis mediterráneo)
4	Muy Alta (bosque de coníferas)

En la Tabla 23 se muestran los resultados de clasificación para cada uno de los parámetros, observándose en la última columna el valor del ICV para cada una de las estaciones, con valores que varían de 1 a 3, predominando los valores de 1 en 11 estaciones climatológicas. En la Figura 17 se muestra la distribución geográfica de éste

índice en el área de estudio, observándose que todos los valores de 1 se encuentran distribuidos en las estaciones de la porción central, hacia el sur y dos hacia la parte norte, los valores de 2 en el área cercana a las sierras y sólo se tiene un valor de 3 en la estación Km 24 al noroeste de Esperanza.

Tabla 23. Obtención del Índice de Calidad de Vegetación en el acuífero Valle del Yaqui.

ESTACIÓN	PROTEC. A LA EROSIÓN (PE)	RESIST. A LA SEQUÍA (RS)	COV. DEL SUELO (CS)	RESIST. AL FUEGO (RF)	ICV
4P6	2	1	2	1	1
4P12	2	1	2	1	1
Bachoco	1	4	1	2	2
Calle 200	2	1	2	1	1
Calle 600	2	1	2	1	1
Calle 1200	2	1	2	1	1
Cd. Obregón	2	1	2	1	1
Col. Yaquis	2	1	2	1	1
Hornos	2	1	2	1	1
Km 14	1	4	1	2	2
Km 24	2	2	1.5	2	3
Km 25	1	4	1	2	2
Km 68	2	1	2	1	1
Obregón Obs	2	1	2	1	1
Porfirio Díaz	2	1	2	1	1
Vícam (SMN)	1	2	1.5	2	1.5

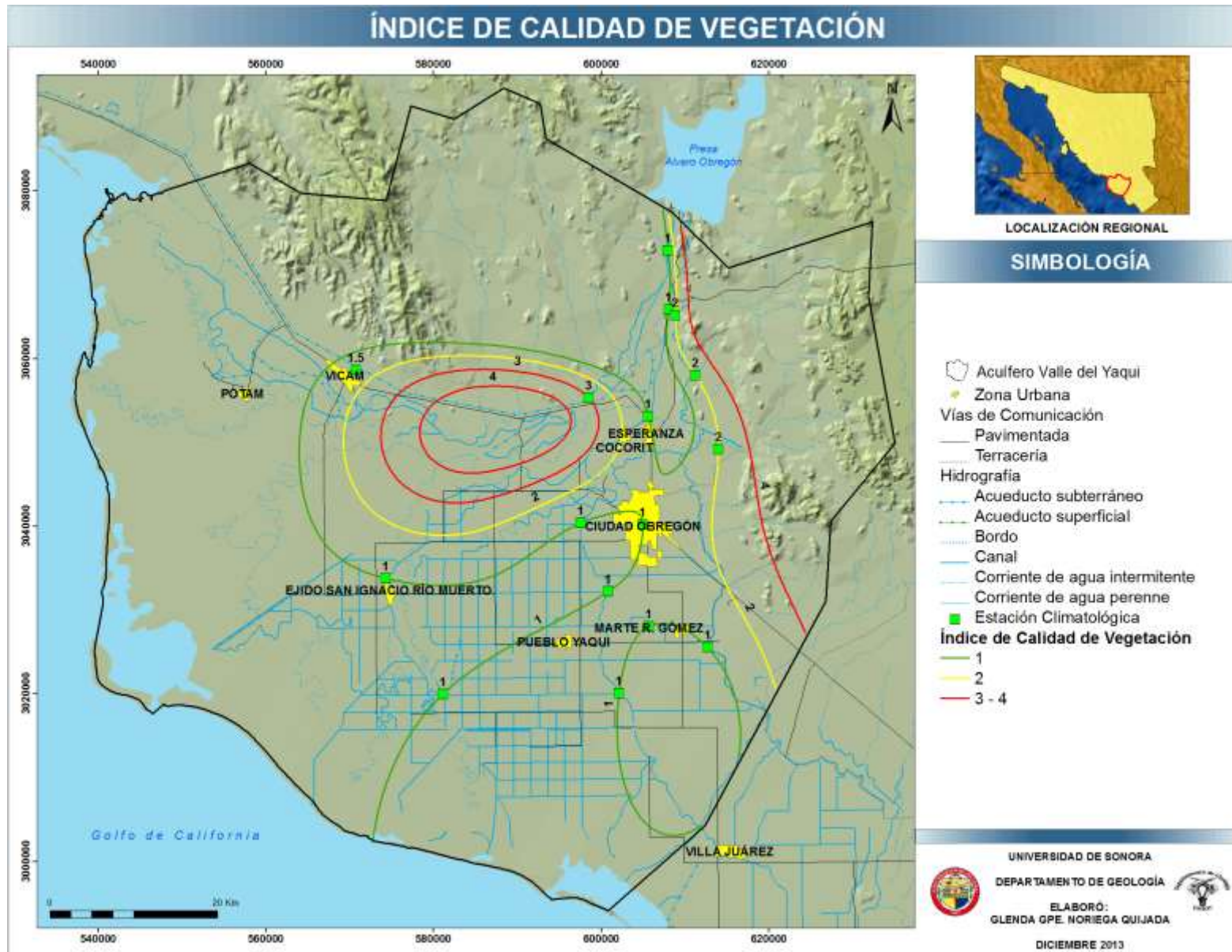


Figura 17. Distribución del Índice de Calidad de Vegetación en el área de estudio.

4.4.3.4 Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD)

El Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD) se obtiene con la media geométrica de los índices de aridez, suelo y vegetación (DISMED, 2008).

$$ISD = (ICC * ICS * ICV)^{1/3}$$

Finalmente el ISD es agrupado de acuerdo a la clasificación de sensibilidad a la desertificación mostrada en la Tabla 24.

Tabla 24. Clasificación para el Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD) (DISMED, 2008).

CLASIFICACIÓN	ISD (ÍNDICE DE SENSIBILIDAD A LA DESERTIFICACIÓN)	DESCRIPCIÓN
1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
2	1.2 ≤ ISD < 1.3	Áreas poco sensibles a la desertificación
3	1.2 ≤ ISD < 1.3	Áreas medio sensibles a la desertificación
4	1.2 ≤ ISD < 1.3	Áreas sensibles a la desertificación
5	ISD ≥ 1.6	Áreas muy sensibles a la desertificación

Como resultado final se obtienen los mostrados en la Tabla 25, en donde se tiene que la clasificación para cada uno de los índices y el resultado final es el Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD), con valores que varían de 0.243 a 0.98. La clasificación para todas las estaciones es de 1 con el ISD <1.2 que corresponde a *áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación*, lo que significa que no son tan propensas a que se presente la desertificación, aunque existen zonas en la parte central y este del acuífero (Estaciones Km 14, Km 24, Km 25 y Bachoco) que se encuentran muy cerca de la clasificación que las incluye como zonas sensibles (Figura 18). Es interesante observar que estas zonas coinciden con las correspondientes a los mayores valores de clasificación para los índices de clima, suelo y vegetación.

Sin embargo, no se descarta que en un futuro esté fenómeno se intensifique, debido principalmente a las condiciones de variabilidad climática como son: la falta de lluvia, la sequía y la aridez, además de la actividad humana.

Tabla 25. Obtención del Índice de Sensibilidad a la Desertificación en el acuífero Valle del Yaqui.

ESTACIÓN	ICC	ICS	ICV	ISD	CLASIF.	ISD	DESCRIPCIÓN
4P6	0.959	0.998	1	0.319	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
4P12	0.960	0.998	1	0.319	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Bachoco	0.977	0.998	2	0.650	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Calle 200	0.960	0.998	1	0.319	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Calle 600	0.962	0.998	1	0.320	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Calle 1200	0.966	0.998	1	0.321	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Cd. Obregón	0.966	0.998	1	0.321	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Col. Yaquis	0.973	0.750	1	0.243	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Hornos	0.974	0.998	1	0.324	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Km 14	0.969	1.500	2	0.969	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Km 24	0.970	0.998	3	0.968	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Km 25	0.980	1.500	2	0.980	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Km 68	0.963	0.998	1	0.320	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Obregón Obs.	0.964	0.998	1	0.321	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Porfirio Díaz	0.964	0.998	1	0.320	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación
Vícam (SMN)	0.965	0.998	1.5	0.481	1	< 1.2	Áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación

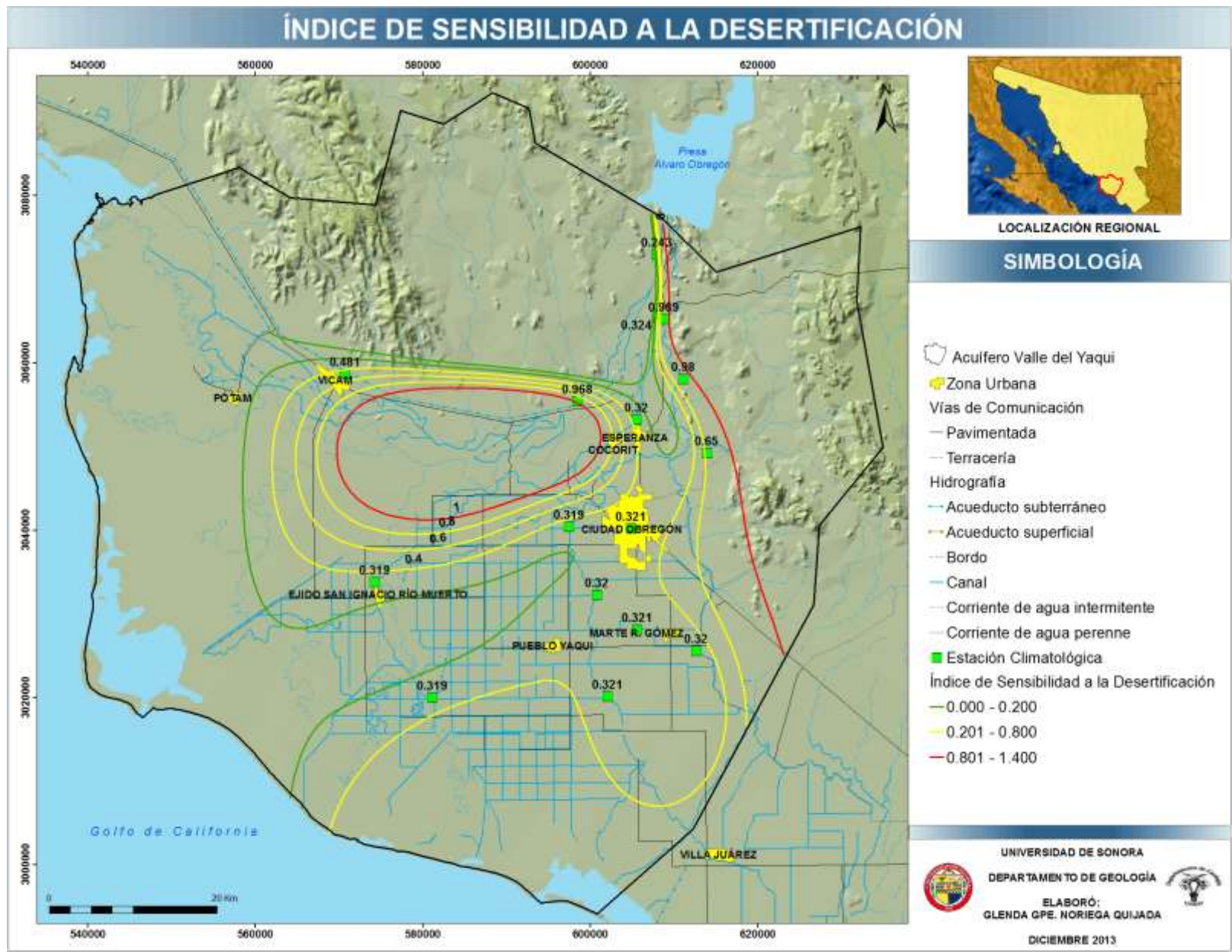


Figura 18. Distribución del Índice de Sensibilidad a la Desertificación en el área de estudio.

5. HIDROGEOLOGÍA

5.1 Tipo de Acuífero

Estudios realizados para el área de estudio en los últimos años, han determinado la existencia de un sistema constituido por dos acuíferos; uno libre en la zona cercana a la superficie, denominado acuífero superior y otro más profundo correspondiente a un sistema de flujo regional, que es de amplia extensión y de espesor y composición variable, por lo que el superficial es de tipo libre y el profundo varía de libre, semiconfinado a confinado.

5.1.1 Acuífero Superior

El nivel freático del acuífero superior es muy somero, en algunas áreas próximas a Cócorit, se puede inclusive observar estacionalmente con niveles menores a 1 m de profundidad, lo que lo hace muy vulnerable en zonas específicas, ya que en este tipo de acuíferos se pueden presentar fenómenos de ascensión capilar del agua hacia la zona de aireación, por una gran evaporación proveniente del suelo sobresaturado, que forma cristales de sales, de aquí su salinización. Sin embargo, este acuífero no se extiende en todo el valle, se presenta sólo por áreas de diversos tamaños, dado que fue originado en forma de relleno sedimentario de zonas topográficamente bajas, por lo que presenta múltiples acuñamientos, de aquí la variedad de sus sedimentos tanto en espesores como en textura y la amplia variación en permeabilidad vertical y horizontal (Monreal-Saavedra, 2003).

Este acuífero yace sobre estratos arcillosos a limo-arcillosos no consolidados de baja permeabilidad, de espesor variable con múltiples acuñamientos a través de los cuales el tránsito de la recarga vertical fluye lentamente mientras se infiltra, ya sea desde el acuífero superior, directamente de las superficies de riego, de los canales, de los drenes no revestidos o bien, el agua puede quedar atrapada por largos periodos de tiempo a diferentes profundidades en este substrato.

5.1.2 Acuífero Regional

El acuífero regional se encuentra en todo el valle, ya sea debajo o no del acuífero superior, por ello puede encontrarse también como libre, de aquí que en general se le ha considerado como de tipo semiconfinado, puesto que en algunas localidades los estratos arcillosos actúan como su techo. Los espesores del acuífero son muy variables, el

espesor máximo observado en los perfiles de pozos es de 250 m, sin embargo en ellos no se muestra que el basamento se encuentra al final del pozo. No obstante, con los estudios geofísicos realizados, así como con la descripción de perfiles de múltiples pozos del Distrito de Riego, se definió su geometría permitiendo reconocer su textura y un espesor promedio de 300 m (Grijalva-Montoya, 2008).

La textura y estructura de los materiales que constituyen el acuífero regional varían también lateralmente, lo cual se refleja en los valores de transmisividad. La variedad de los valores de parámetros hidráulicos lo ubican como libre, semiconfinado y confinado, dependiendo del sitio donde se haya realizado la prueba de bombeo.

5.2 Piezometría

5.2.1 Profundidad al Nivel Estático

Para el análisis de la profundidad al nivel estático se realizaron las configuraciones para cinco periodos distintos con la finalidad de observar el comportamiento del nivel estático desde el año de 1970 hasta el 2008, último año posible de recolectar para este trabajo en donde esta disponibilidad de datos también varía para cada periodo (Figura 19).

Para 1970 se realizó la configuración con la información de 50 aprovechamientos de aguas subterráneas, se puede observar que la profundidad varía de 2.99 a 38.59 metros, localizándose el valor mínimo en la parte norte en el poblado de Cócorit y el máximo en la parte este del acuífero. En general las máximas profundidades se presentan en la parte central y este del área de estudio y van disminuyendo hacia la línea de costa.

Para el año de 1980 se contó con la información de 190 pozos en los que se tiene que el nivel varía de 2.30 a 64 metros, los valores mas bajos se presentan en la parte central y hacia la línea de costa y las profundidades mas elevadas en la parte este. Para 1990 se contó con la mayor cantidad de datos de pozos con un total de 366, en los cuales la profundidad varía de 0.38 a 79.4 metros, con los valores mas bajos en la parte central y línea de costa y los mayores hacia la parte este.

Para el año 2001 se realizó la configuración de la profundidad del nivel estático, ya que este año se tuvo mas información que en el 2000, con 181 pozos, con la profundidad

variando de 1.46 a 77.10 metros, el comportamiento de la profundidad es igual al observado en los años anteriores.

Para el 2008 la configuración de la profundidad al nivel estático fue realizada con 281 aprovechamientos con el nivel de 0.58 a 43.60 metros, los valores mas bajos en la parte central y línea de costa y los mayores en el este (Figura 20).

PROFUNDIDAD AL NIVEL ESTÁTICO

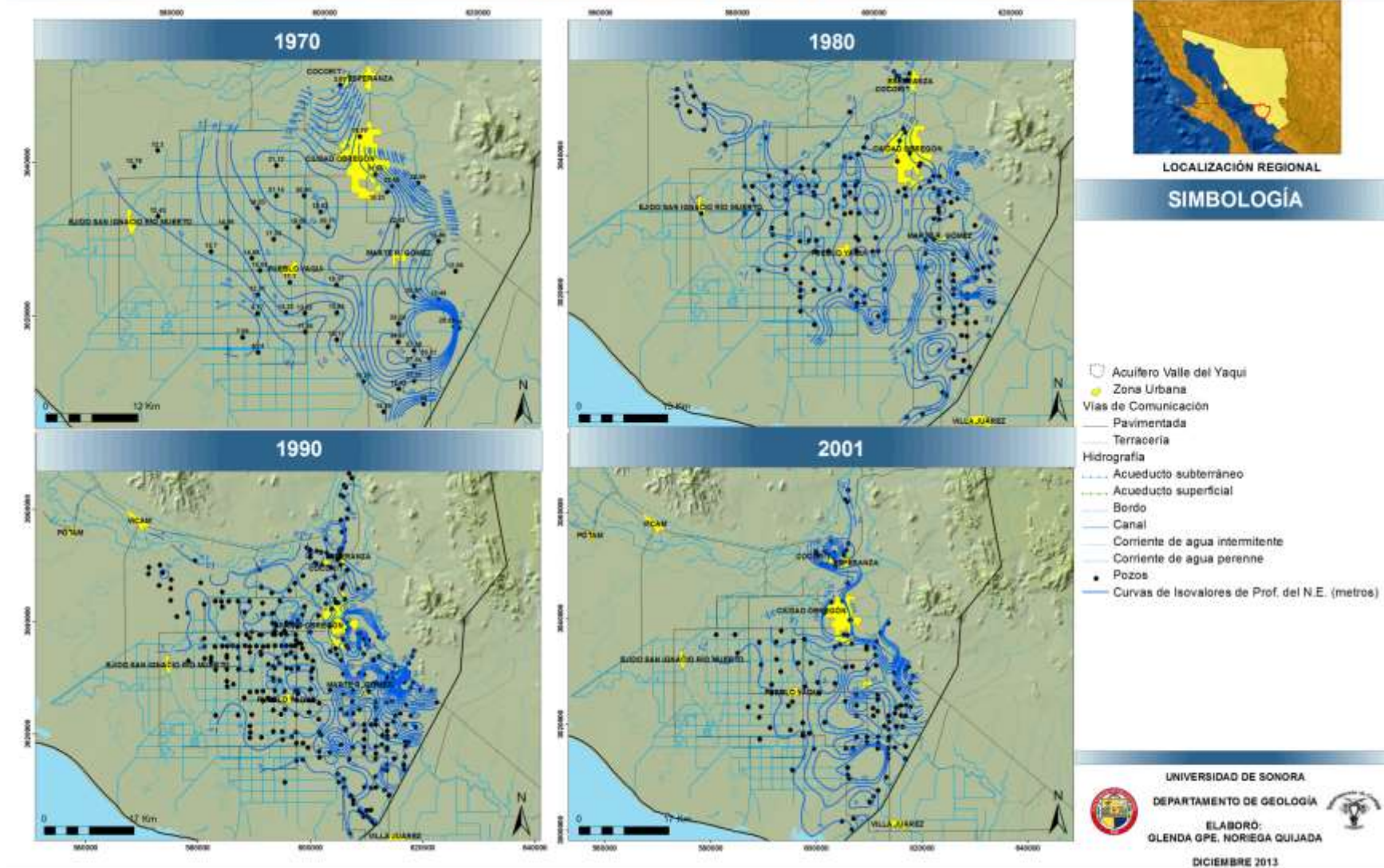


Figura 19. Profundidad al nivel estático para los años 1970, 1980, 1990 y 2000 en el acuífero Valle del Yaqui.

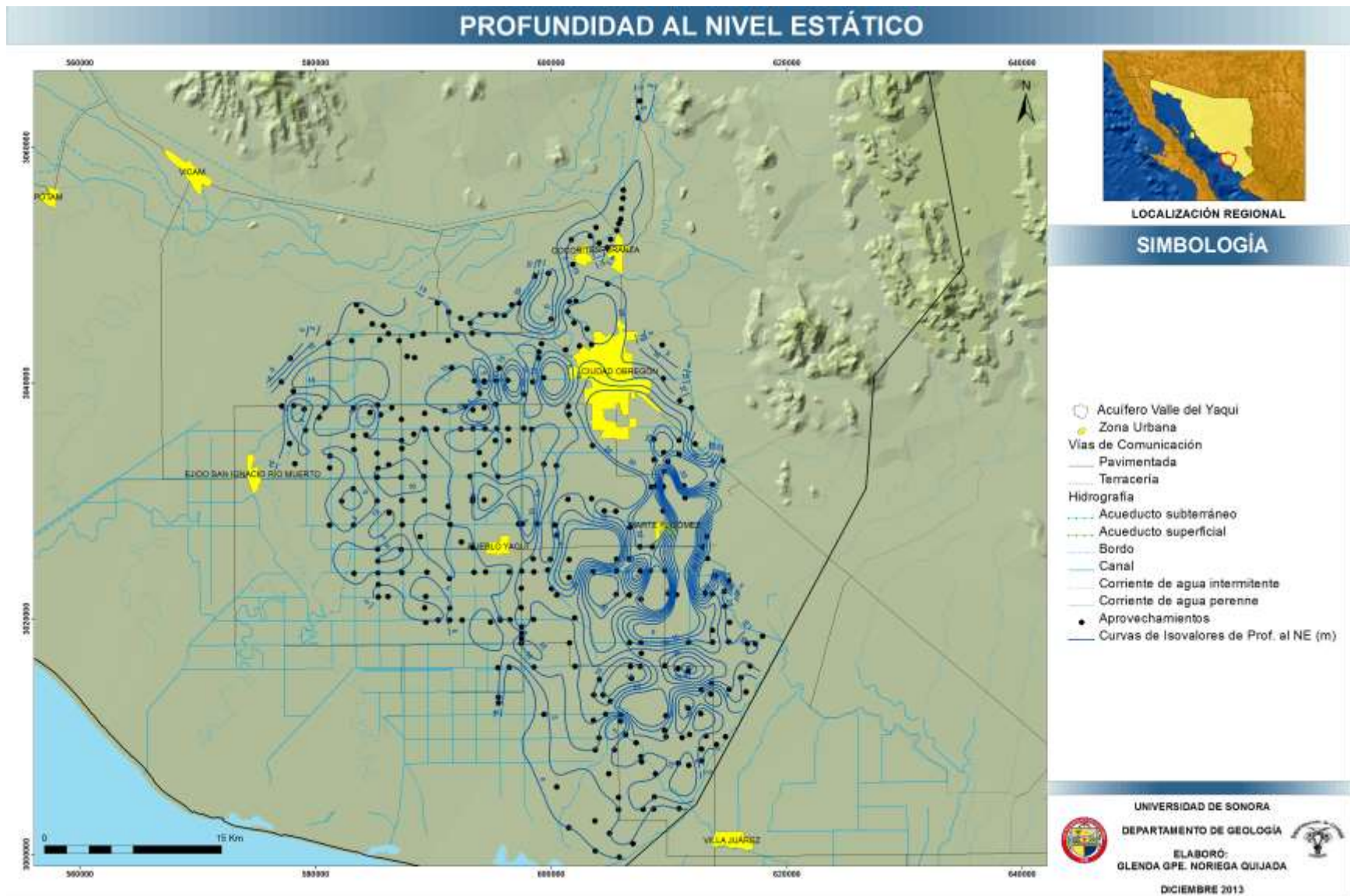


Figura 20. Profundidad al nivel estático para el año 2008 en el acuífero Valle del Yaqui.

5.2.2 Elevación del Nivel Estático

Para obtener las configuraciones de elevación del nivel estático se utilizó la información de los aprovechamientos subterráneos usados en las configuraciones de la profundidad al nivel estático en el área de estudio (Figura 21).

El plano de elevación del nivel estático para 1970 muestra que los valores varían de 1.59 a 49.89 m.s.n.m., en la zona cercana a la línea de costa las elevaciones son más someras y oscilan entre 0 y 5 m y van aumentando gradualmente hacia la parte central, al norte y son más elevadas en el este.

Para 1980 las elevaciones varían de 2.66 a 44.14 m.s.n.m. y en 1990 son de 0.20 a 50.7 m.s.n.m., localizándose las elevaciones que se encuentran entre 5 y 15 m de la parte central hacia la línea de costa, los valores que oscilan entre 20 y 25 m se distribuyen en la parte norte y hacia el este del acuífero, mientras que los valores de 30 a 50 m se distribuyen principalmente en el este y algunos hacia el norte. En estos años se puede observar la presencia de algunos conos de abatimiento hacia la parte este del acuífero, debido posiblemente al sobrebombeo estacional concentrado.

En el 2001 las elevaciones oscilan de 1.45 a 47.5 m.s.n.m. en donde los valores de 5 a 15 m están localizados en la porción central y sur y hacia la línea de costa, al igual que en los años anteriores los valores mayores a los 20 m se presentan hacia el este y norte del área de estudio.

Para el año 2008 las elevaciones del nivel estático varían de 0.68 a 62.43 m.s.n.m., en la parte central y cercana a la línea de costa las elevaciones son de 0 a 10 m y son mayores de 20 m en la parte norte, este y algunos conos de abatimiento en el oeste (Figura 22).

La configuración general de la dirección del flujo subterráneo es hacia el sur esto se refleja en la porción norte de la zona acuífera específicamente en el actual cauce del río Yaqui. En la parte este y central el flujo viaja con dirección casi este-oeste y en la zona este, las direcciones son inducidas hacia los conos de abatimiento.

ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO (m.s.n.m.)

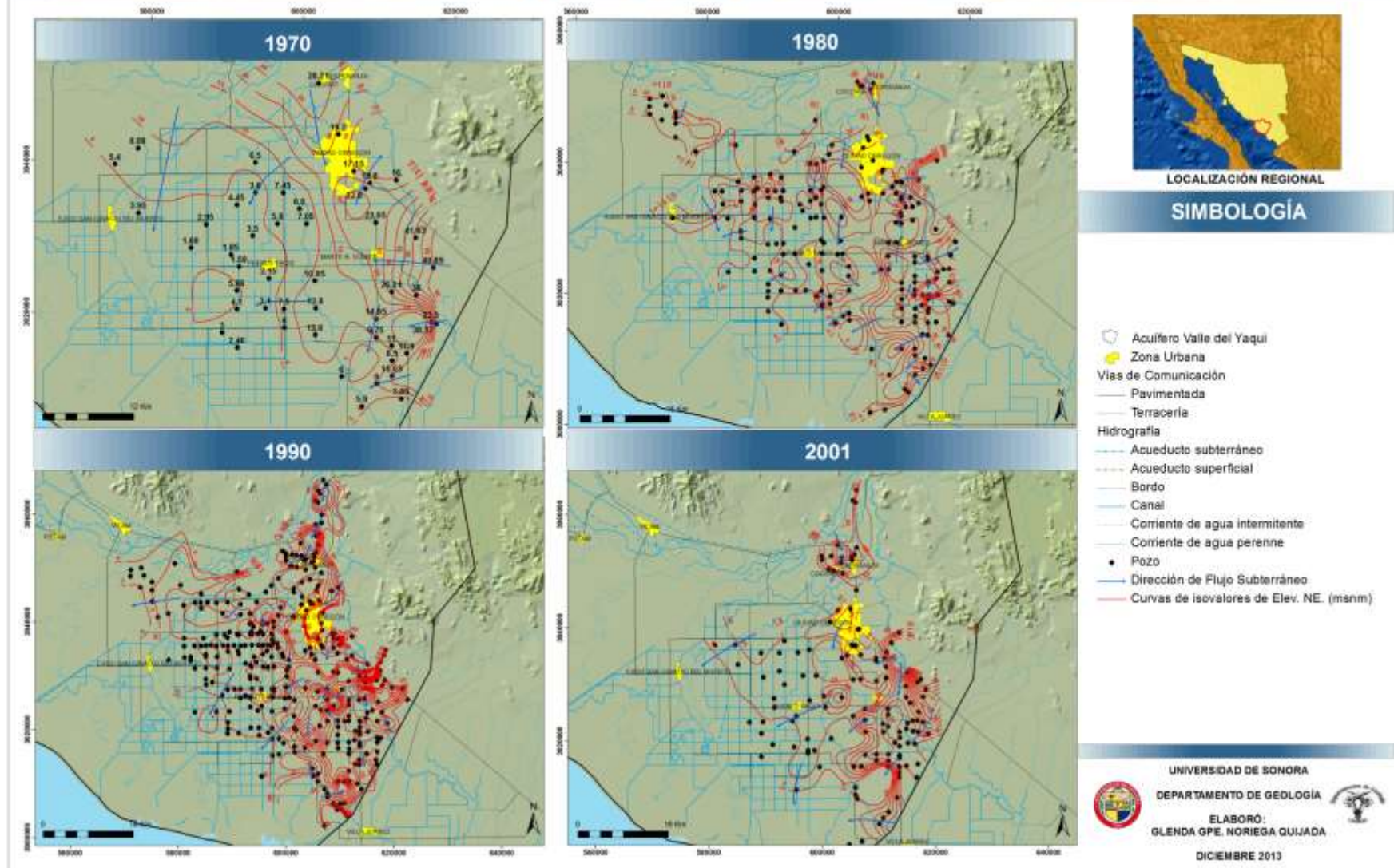


Figura 21. Elevación del nivel estático para los años 1970, 1980, 1990 y 2000 en el acuífero Valle del Yaqui.

ELEVACIÓN DEL NIVEL ESTÁTICO (m.s.n.m.)

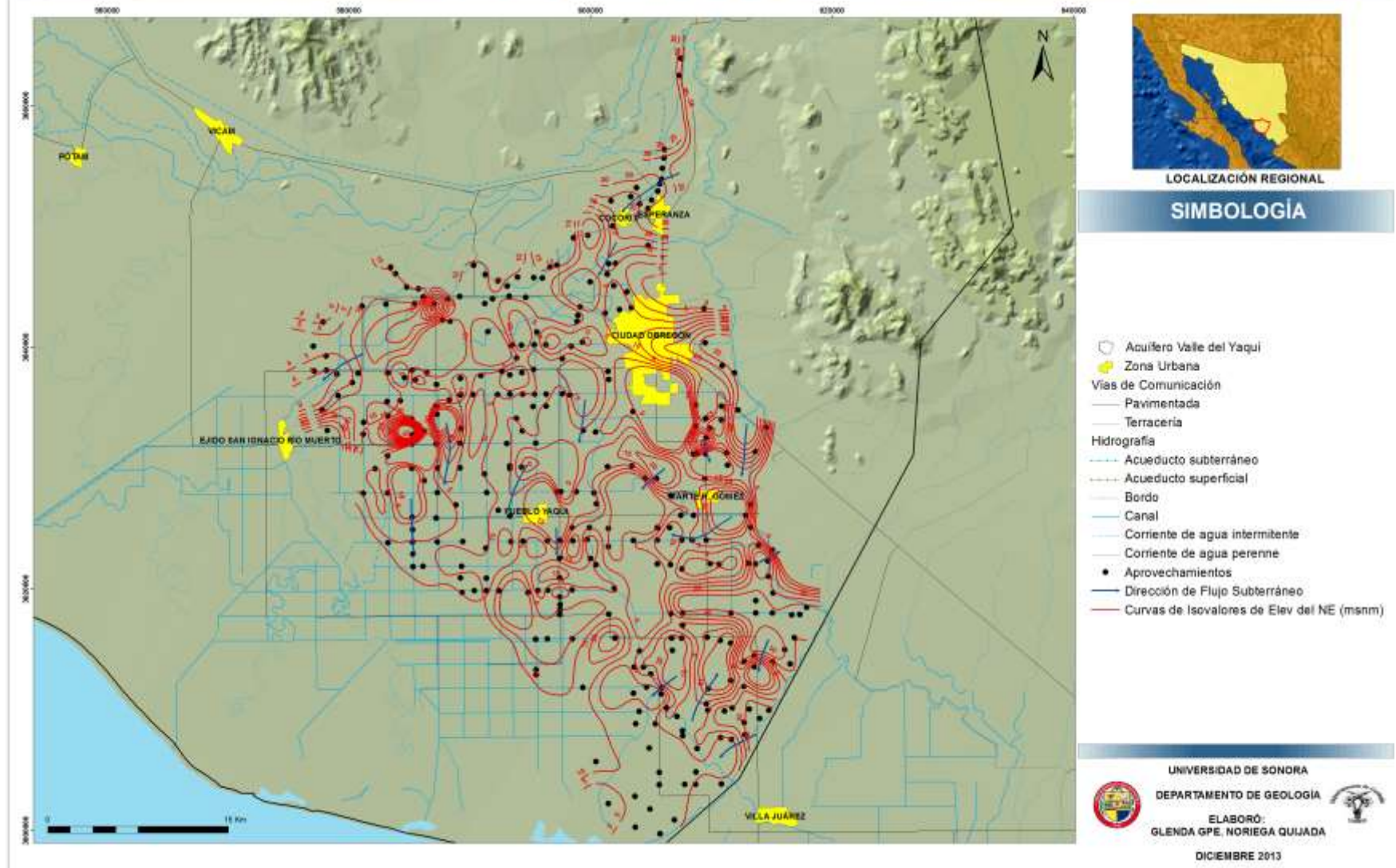


Figura 22. Elevación del nivel estático para el año 2008 en el acuífero Valle del Yaqui.

5.2.3 Evolución del Nivel Estático

El análisis de la evolución del nivel estático se realizó para tres periodos de 10 años cada uno, abarcan de 1970 a 1980, 1980 a 1990 y de 1990 a 2000 (Figura 23). El periodo de 1970 a 1980 se realizó con la información disponible de 41 aprovechamientos de aguas subterráneas, con los cuales se realizaron las configuraciones de la evolución del nivel estático, obteniéndose valores de abatimiento de -3.95 a -45.76 m localizados principalmente hacia la parte este del acuífero, mientras que las recuperaciones oscilan de 0.19 a 28.14 m.

Para el periodo de 1980 a 1990 las configuraciones se realizaron con los datos de 144 pozos, en los cuales se observan abatimientos de -12.10 a -0.21 m principalmente en la porción este del acuífero, donde se tiene la presencia de varios conos. Las recuperaciones varían de 0.40 a 19.75 m y se distribuyen en la parte central del valle, unas hacia la porción norte y otras en el sur.

Para el periodo de 1990 a 2000 se tomó en cuenta la información de 46 pozos, con conos abatimiento que varían de -0.23 a -33 m en la parte este del acuífero y las recuperaciones se encuentran entre 0.27 a 63 m distribuidos principalmente en las cercanías de Ciudad Obregón y en la porción norte y sur del acuífero.

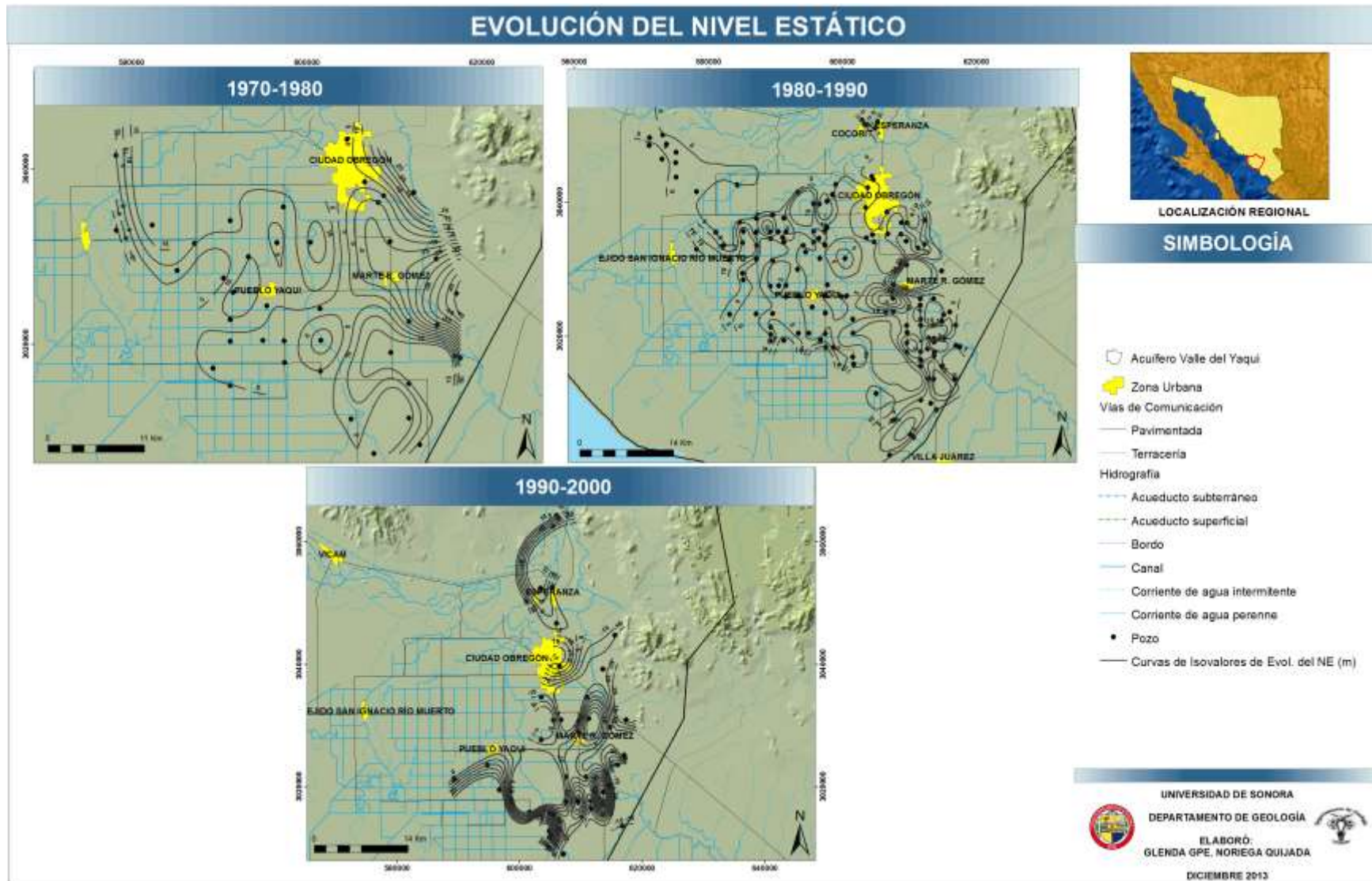


Figura 23. Evolución del nivel estático para los periodos 1970- 1980, 1980-1990 y 1990-2000 en el acuífero Valle del Yaqui.

5.3 Hidrógrafos

Se realizaron cuatro hidrógrafos con la finalidad de observar de manera gráfica el comportamiento del nivel estático para tres periodos de 10 años aproximadamente cada uno, debido a que no todos contaban con información completa en algunos años. En la Figura 24 se observa la localización de los pozos utilizados para cada uno de los hidrógrafos, los cuales se encuentran distribuidos unos en la parte central, otros al norte y al este del acuífero.

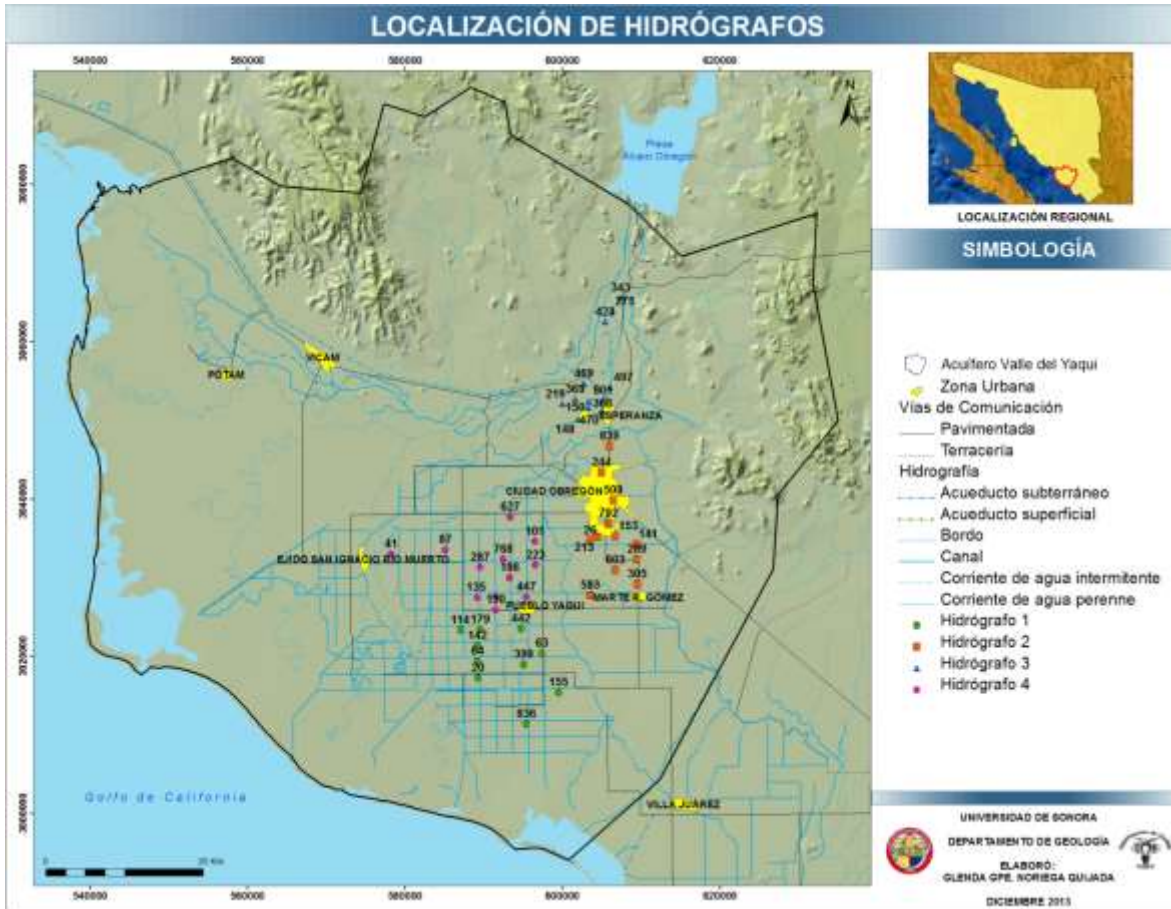


Figura 24. Localización de los pozos utilizados para cada uno de los hidrógrafos en el área de estudio.

Hidrógrafo 1

Los pozos que integran el hidrógrafo 1 son 10 y se localizan en la porción central sur del acuífero, en donde se observa que la mayoría de los pozos mantiene su nivel más o menos constante menor a los 5 metros, a excepción de los pozos 63 y 155 en donde se observa que el nivel ha bajado y se ha recuperado con variaciones que van de los 5 hasta

los 15 metros (Figura 25). A principios de los años 80 se observa una ligera disminución del nivel debido posiblemente a menor recarga del acuífero o al sobrebombeo del área.

Hidrógrafo 2

En el hidrógrafo 2 los pozos se localizan en la parte sur y norte de Ciudad Obregón y está constituido por 12 pozos, en donde se observa que en la mayoría de los registros inician a finales de los años 70 con descensos y ascensos, cuyos valores varían de 10 hasta casi los 40 m. A finales de 1990 y hasta el 2000 se muestran valores mas o menos constantes menores a los 30 metros (Figura 26).

Hidrógrafo 3

El hidrógrafo 3 está integrado por 12 pozos que se localizan en la parte norte del acuífero en las inmediaciones de Esperanza y Cócorit y otros al sur de la Presa Álvaro Obregón, en ambos periodos se observa que la profundidad se mantiene por debajo de los 10 metros con pequeñas variaciones que no son tan significativas (Figura 27). En el periodo de 1990 a 2000 en el pozo 368 la profundidad varía de los 15 a casi 25 metros, con tendencia a bajar.

Hidrógrafo 4

Los 12 pozos del hidrógrafo 4 se localizan en la parte central del acuífero al norte de Pueblo Yaqui, se observa que para inicios de los ochentas en todos los pozos se registra un descenso en la profundidad y a partir de 1985 inicia un periodo de recuperación el cual se mantiene constante con pequeñas variaciones no significativas (Figura 28).

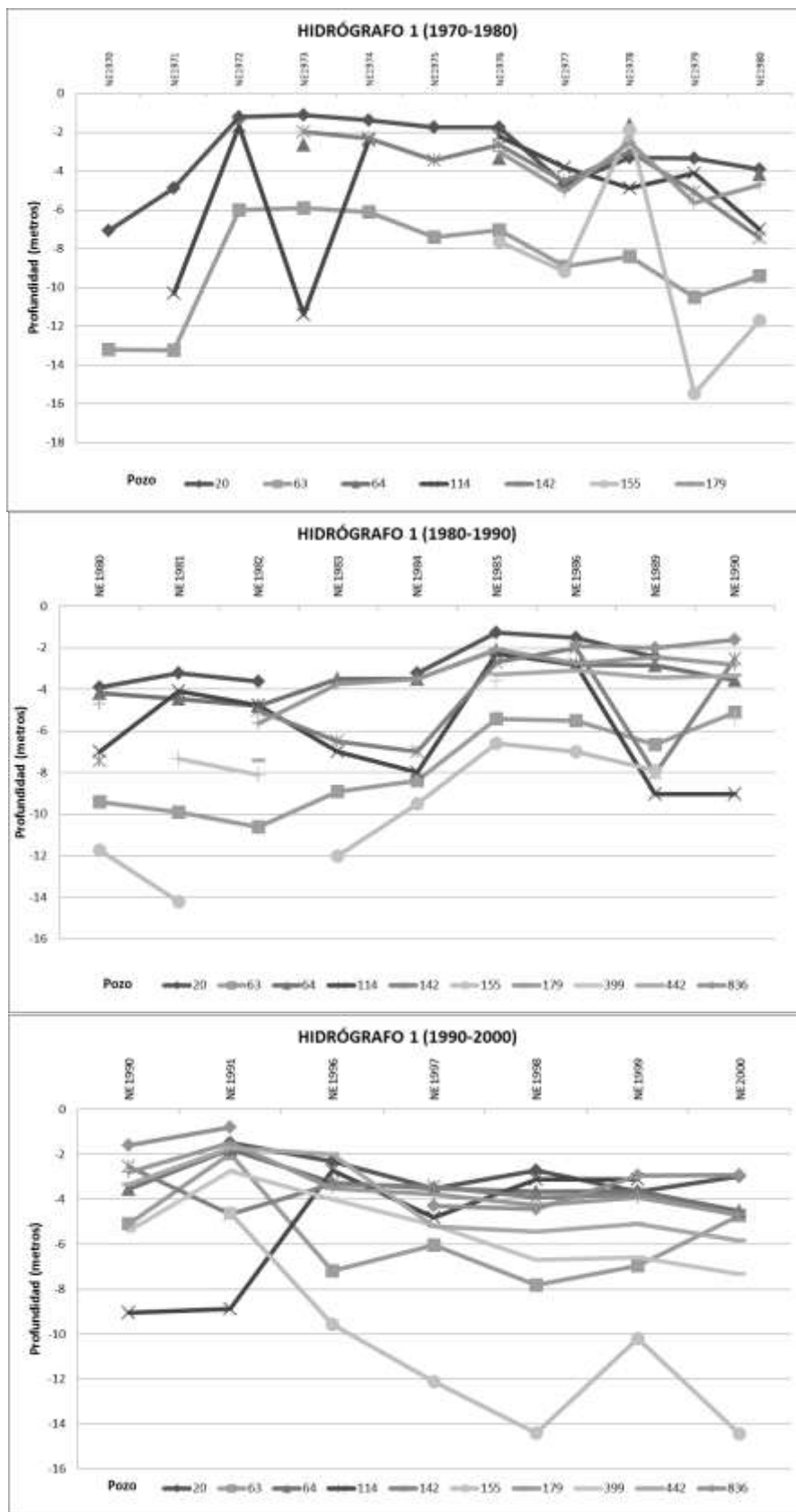


Figura 25. Hidrógrafo 1.

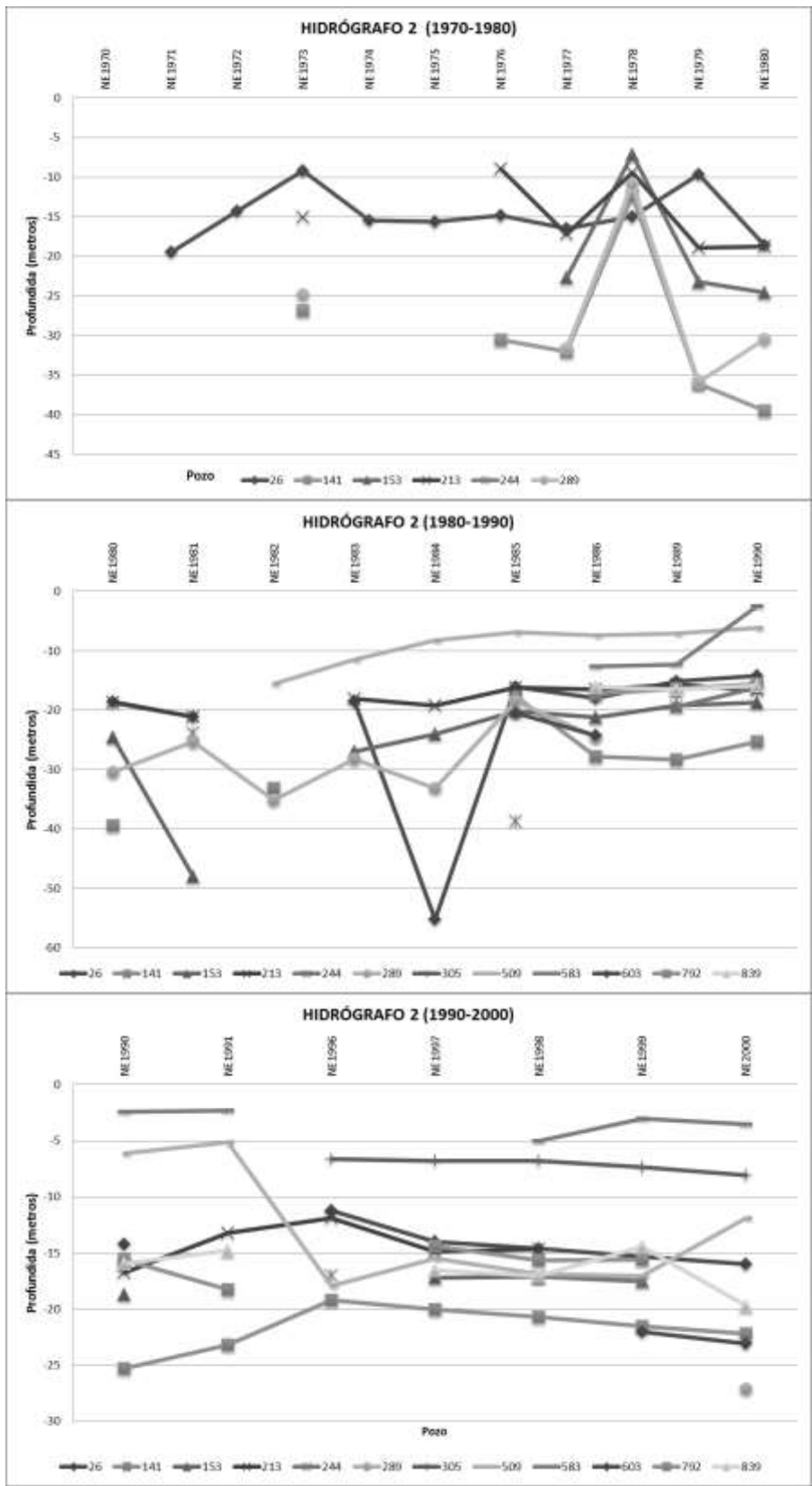


Figura 26. Hidrógrafo 2.

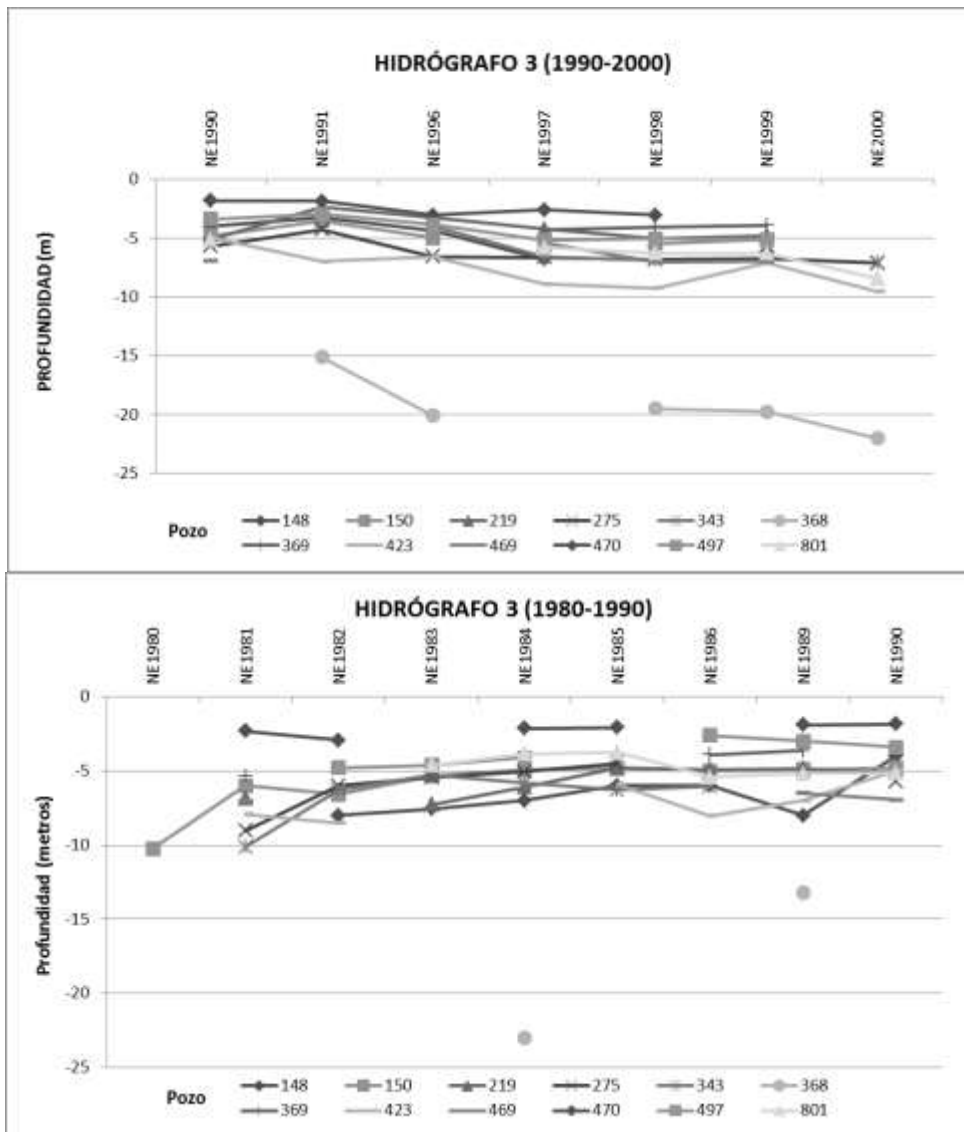


Figura 27. Hidrógrafo 3.

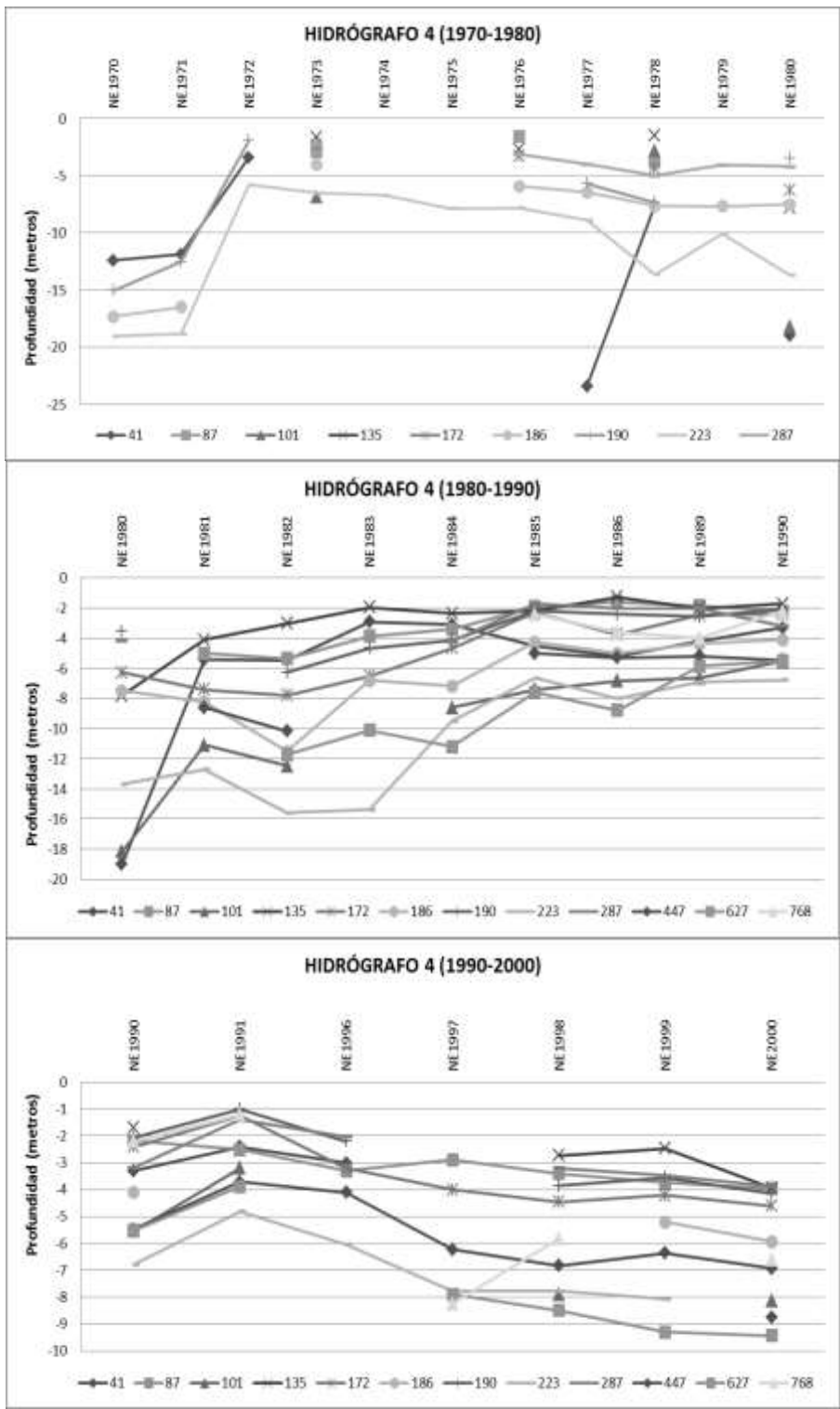


Figura 28. Hidrógrafo 4.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El área de estudio ha sido calificada por diversos autores como autocontaminante por la presencia de suelos salinizados, efecto producido por los altos niveles freáticos de diversas zonas del acuífero superior, en donde se produce alta evaporación que genera cristales de sales, los cuales una vez lavados por el riego agrícola rodado, son disueltos y han producido la salinización. Los climodiagramas elaborados para las estaciones climatológicas existentes en el área de estudio, permiten observar la relación que existe entre esta salinización y las condiciones de aridez, que serían los de mayor producción de cristales de sales lavadas que es cuando se lleva a cabo el riego rodado de segundos cultivos. Los meses de mayor aridez que coinciden con esto, corresponden a marzo, abril, mayo y junio y en la mayoría de las estaciones es en el mes de julio cuando se comienza a recuperar la precipitación por la presencia de las primeras lluvias, mientras que agosto y septiembre son los meses considerados como semihúmedos y en donde las temperaturas y precipitaciones son mas elevadas, pero igualmente la evaporación se incrementa.

Con los resultados obtenidos del Índice de Martonne se observa que en la parte central del acuífero, hacia la línea de costa, el ambiente se clasifica como *semidesértico*, *árido* y hacia la parte norte y este del área de estudio el ambiente es de tipo *semiárido*.

Una integración de los índices obtenidos muestra que con el Índice de Erosión Potencial de Fournier la clasificación obtenida indica zonas que varían de *muy baja a baja* erosión, solamente en una de ellas se presenta moderada. La clasificación de muy baja erosión se distribuye desde la parte central y hacia la línea de costa y la de baja erosión se presenta en la porción norte y este del área de estudio. Esta definición de zonas se correlaciona con aquellas en donde la salinización de suelos tiende a ser menor.

Por lo tanto, al comparar los resultados obtenidos para el índice de Martonne y de Fournier, se puede observar con ambos métodos, que se define la existencia de dos zonas, las cuales presentan características climatológicas similares, una en la parte central del área de estudio hacia la línea de costa y la otra corresponde a la parte norte y este. Por su parte, el análisis para el Índice de Calidad de Clima (ICC) realizado para cuatro periodos distintos, tres de 10 años y el último de 8 años, con la finalidad de observar las variaciones de la aridez en el área de estudio, definen que, en todos los

periodos el ICC es >0.65 correspondiendo a la zona climática húmeda y cuya clasificación es 1. Por lo tanto, para todos los periodos se tienen las zonas más áridas hacia la parte central del acuífero y hacia la línea de costa y va disminuyendo hacia las zonas serranas del este y cercanas a la presa Álvaro Obregón, correspondiendo principalmente a las zonas de recarga del acuífero y al cauce principal del río Yaqui, en donde el agua es por tanto de menor calidad.

Esta salinización está directamente relacionada con el tipo de suelo de cada zona, de aquí que el Índice de Calidad de Suelo (ICS) con los valores obtenidos que varían de 0.75 a 1.5, predominando 0.998 en 13 estaciones. La distribución de estos valores en el acuífero Valle del río Yaqui con 0.998 se localizan en toda la parte central del acuífero y los valores de 1.5 hacia la parte topográficamente más alta en el este del acuífero en las estaciones Km 14 y Km 25. Claramente estos resultados están relacionados con el tipo de suelo presente; los valores de 0.998 se encuentran en los xerosoles, el más bajo de 0.75 en el fluvisol en donde se tiene mejor drenaje y por tanto mayor velocidad del agua en su infiltración mientras que los de 1.5 corresponden a litosoles.

Por su parte el Índice de Calidad de Vegetación (ICV) para cada una de las estaciones varía de 1 a 3, predominando los valores de 1 en 11 estaciones climatológicas. Dentro del área de estudio los valores de 1 se encuentran distribuidos de la parte central hacia el sur y dos hacia la parte norte; los valores de 2 en la parte cercana a las sierras y sólo se tiene un valor de 3 en la estación Km 24 al noroeste de Esperanza. Estos índices correlacionados con los resultados obtenidos para el Índice de Sensibilidad a la Desertificación (ISD), que varían de 0.243 a 0.98, en donde la clasificación es de 1 con el $ISD < 1.2$, que corresponden con *áreas no afectadas o áreas muy poco sensibles a la desertificación*, en contraparte, significa que no son tan propensas a que se presente la desertificación, aunque existen zonas en la parte central y este del acuífero (Estaciones Km 14, Km 24, Km 25 y Bachoco) que se encuentran muy cerca de la clasificación que las incluye dentro de las zonas sensibles. Estas zonas coinciden de igual manera con las correspondientes a los mayores valores de clasificación asignados para los índices de aridez, erosión, clima, suelo y vegetación.

Con relación al comportamiento hidrodinámico del acuífero, la configuración de la profundidad al nivel estático de 1970 varía de 2.99 a 38.59 metros, en general con las máximas profundidades presentes en la parte central y este del área de estudio y van disminuyendo hacia la línea de costa. Para el año de 1980 el nivel varía de 2.30 a 64

metros, en donde los valores mas bajos se presentan en la parte central y hacia la línea de costa y las profundidades mas elevadas en la parte este. Para 1990 la profundidad varía de 0.38 a 79.4 metros, con los valores mas bajos en la parte central y línea de costa y los mayores hacia la parte este. Para el año 2001 la profundidad se encuentra entre 1.46 a 77.10 metros, el comportamiento de la profundidad es igual al observado en los años anteriores.

Representada está dinámica como elevación del nivel estático, se aprecia que para 1970 varía de 1.59 a 49.89 m.s.n.m., en la zona cercana a la línea de costa las elevaciones son más someras y oscilan entre 0 y 5 m y van aumentando gradualmente hacia la parte central, al norte y son más elevadas en el este. Para 1980 las elevaciones varían de 2.66 a 44.14 m.s.n.m. y en 1990 son de 0.20 a 50.7 m.s.n.m., localizándose en ambos años las elevaciones entre 5 y 15 m de la parte central hacia la línea de costa, los valores que oscilan entre 20 y 25 m se distribuyen en la parte norte y hacia el este del acuífero, mientras que los valores de 30 a 50 m se distribuyen principalmente en el este y algunos hacia el norte. En estos años se puede observar la presencia de algunos conos de abatimiento hacia la parte este del acuífero. En el 2001 las elevaciones oscilan de 1.45 a 47.5 m.s.n.m. en donde tenemos que los valores de 5 a 15 m están localizados en la porción central y sur y hacia la línea de costa, al igual que en los años anteriores los valores mayores a los 20 m se presentan hacia el este y norte del área de estudio. Lo anterior, sugiere la correlación directa que existe entre el índice de aridez y la mayor sensibilidad de la parte central del acuífero con su condición de aridez, más que con la extracción de agua subterránea

La configuración de flujo subterráneo se define en general hacia el sur, esto se refleja en la porción norte de la zona acuífera específicamente en el actual cauce del río Yaqui. En cambio en las porciones este y central, el flujo es con dirección casi este-oeste y en la zona este, las direcciones son varias inducidas hacia los conos de abatimiento.

Del análisis de la evolución del nivel estático realizado para tres periodos de 10 años cada uno (1970-1980, 1980-1990 y 1990-2000), se observa que en el periodo de 1970 a 1980, los valores de abatimiento son de -3.95 a -45.76 m localizados principalmente hacia la parte este del acuífero, mientras que las recuperaciones oscilan de 0.19 a 28.14 m. Para el periodo de 1980 a 1990 los abatimientos son de -12.10 a -0.21 m principalmente en la porción este del acuífero, donde se tiene la presencia de varios conos. Las recuperaciones varían de 0.40 a 19.75 m y se distribuyen en la parte central del valle,

unas hacia la porción norte y sur. Para 1990 a 2000 los abatimiento varían de -0.23 a -33 m en la parte este del acuífero y las recuperaciones se encuentran entre 0.27 a 63 m distribuidos principalmente en las cercanías de Ciudad Obregón y en la porción norte y sur del acuífero.

Al comparar los resultados de la distribución de cada uno de los índices analizados y los de la piezometría se observa que en la parte este del acuífero, donde se tienen las zonas que se encuentran muy cerca de la clasificación de zona sensible a la desertificación (Estaciones Km 14, Km 24, Km 25 y Bachoco), es también en donde los valores de la profundidad y elevación del nivel estático son elevados, los cuales se han ido incrementando gradualmente con el transcurso de los años. De igual manera, al analizar el comportamiento del nivel estático principalmente en los hidrógrafos 2 y 3, que son los que se localizan mas próximos a la zona cercana, y más sensible a la desertificación, se puede observar un ligero descenso de la profundidad del nivel estático, en este caso debido probablemente al sobrebombeo o, a la escasa infiltración hacia el acuífero por la falta de lluvias, ya que éstos pozos se encuentran en la zona de recarga o muy cercanos al cauce principal del río Yaqui.

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo se puede establecer como una metodología para realizar un diagnóstico de la desertificación en cualquier acuífero o zona de estudio, siempre y cuando se cuente con la información necesaria para realizar el análisis. Con esta metodología se pueden obtener las áreas más propensas a la desertificación y así poder encontrar alternativas para poder combatirla y evitar su avance, como son el cambio en los sistemas de riego, sustitución de cultivos, reforestación, cambio de uso de suelo, entre otros.

La metodología utilizada es práctica, ya que los parámetros involucrados se pueden evaluar a partir de la información generada por diferentes instituciones a nivel nacional y la cual se puede obtener fácilmente y usar de acuerdo a las necesidades de cualquier área de estudio.

Los distintos índices climatológicos presentados en este trabajo pueden ser analizados por separado para cualquier acuífero o zona de estudio, para detectar áreas específicas

que se encuentran más afectadas y establecer cuales son más vulnerables, según sea el índice del que se trate.

Con este trabajo se determinó que es posible correlacionar las zonas que presentan mayor aridez con el comportamiento del nivel freático, con la finalidad de establecer medidas adecuadas para la extracción y uso del agua, y así evitar que se llegue a la desertificación.

8. REFERENCIAS CITADAS

- Aguirre-Salado, Treviño-Garza, Aguirre-Calderón, Jiménez-Pérez, González-Tagle, Valdez-Lazalde, 2012, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Desertification-Climate Change Interactions-Mexico's Battle Against Desertification, Diversity of Ecosystems, p. 167-182
- Ansaldo-Leyva, 1999, Estimación de la aportación media por infiltración del canal principal bajo en la sección de la batería de pozos que abastecen a Guaymas – Empalme en el Acuífero del Valle aluvial del Río Yaqui. Tesis de Maestría en Ingeniería, Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Bateman, 2007. Hidrología básica y aplicada. Grupo de Investigación en Transporte de Sedimentos (GITS).
- Brandt-Geeson, Desertificación e Indicadores, Land Care In Desertification Affected Areas, Serie Folletos: A, No. 2, p. 19.
- Capel Molina, 1982. La aridez en la Península Ibérica. Algunos índices bioclimáticos. Homenaje almeriense al botánico Rufino Sagredo. Instituto de estudios almerienses, Almería, p. 11-35.
- Cirett-Galán, 2006. Diseño de una Red de Monitoreo Piezométrico Utilizando SIG y Geoestadística. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Hermosillo, Son., México.
- CLC, 1990, 2000. Corinne Land Cover, Base de datos de ocupación del suelo Europea referida al año de 1990 y 2000, escala 1: 100,000, Consejo de Ministros de la Unión Europea, Agencia Europea del Medio Ambiente.
- Comisión Nacional de Zonas Áridas (CONAZA) y Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 1994. Plan de Acción para Combatir la Desertificación en México.

- Conabio, 1996. Clasificación climática de México. Semarnat-CP. Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000.
- Cortés, T., H. G., 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Posgraduados, Montecillos, México. 168 p.
- Custodio, E., M.R. Llamas, J. Samper, (1997). La evaluación de la Recarga a los acuíferos en la planeación hidrológica. Textos del Seminario celebrado en Las Palmas de Gran Canaria, Instituto Tecnológico Geominero de España, AIH, Grupo español. 453 p.
- Monreal-Saavedra, Rangel-Medina, Minjárez-Sosa, Morales-Montaña, Ochoa-Granillo, 2003. Estudio de Actualización Geohidrológica del acuífero "Valle del Yaqui" municipio de Cajeme, Sonora. Departamento de Geología, Universidad de Sonora.
- DISMED, 2008. Desertification Information System for the Mediterranean, United Nation Convention to combat desertification (UNCCD). Regional profiles (Northern Mediterranean; Central-Eastern Europe).
- Esquer-Villalobos, 2001. Localización de la interfase salina en los valles de Boca Abierta y Guaymas, Sonora y una propuesta de manejo para sus acuíferos. Tesis de Maestría en Ciencias de Recursos Naturales. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Flores-Tapiz, 2001, La calidad del agua para riego agrícola de pozos profundos del Valle del Yaqui con énfasis en toxicidad de Boro, Cloruros y Sodio. Tesis de Maestría en Administración con especialidad en Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Fournier, F., 1960. Climat et érosion. Presses Universitaires de France, París.
- FMA, 2009. Applied Meteorological Foundation, European Environment Agency (EEA), Desertification and its effects on environment and agricultural production in Romania. Annals. Food Science and Technology.
- García, E., 1988 Modificaciones al sistema climático de Köppen adaptado para México. Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Geólogos Consultores Asociados, S.A., 1979, Estudio de las condiciones geohidrológicas, sitios adecuados perforación y delimitación de acuíferos terciarios de los Valles intermontanos de Yecora, Río Chico, Los Cedros, Jincora Y Cocoraque, Estado de Sonora. Volumen I. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subdirección de Geohidrología y zona áridas. Sonora, México.

- Gómez-Aldama, 1992, Un modelo de programación por redes para planear la operación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en optimización de sistemas productivos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- González-E. M.I., 1992, Evolución de la salinidad y contaminación por agroquímicos en el acuífero del valle del Yaqui, Sonora. Anexo Trece. Convenio celebrado entre "IMTA-ITSON-GRNO". Primer informe bimensual.
- Grijalva-Montoya, 2008. Hidroestratigrafía del Acuífero del Valle del Río Yaqui, Sonora. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Hermosillo, Son., México.
- Granados-Sánchez, Hernández-García, Vázquez-Alarcón, Ruíz-Puga, 2013. Los Procesos de Desertificación y las Regiones Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, vol. 19, núm. 1, pp. 45-66., Chapingo, México.
- Gutiérrez-Heredia, 2004. Evolución Geomorfológica del Valle del Yaqui y su influencia en los Parámetros Hidrogeológicos e Hidrogeoquímicos. Tesis de Licenciatura. Universidad de Sonora, Departamento de Geología, Hermosillo, Son., México.
- ICATEC, Consultores, 1970, Estudio Geohidrológico del Valle del Yaqui, Sonora, (Distrito de Riego 041). Informe Interno para la Dirección de Aguas Subterráneas, Secretaría de Recursos Hidráulicos.
- IEISACH (Instituto de Estudios, Investigaciones y Servicios Agrípef Chapingo, S.C.), 1986, Evaluación de la eficiencia hidráulica y electromecánica de los pozos del distrito de riego del Río Yaqui, Sonora. Secretaría de infraestructura hidráulica. Dirección General de Seguimiento y control de obras hidráulicas. Memoria Técnica. México, D.F.
- INE, 1995. Estudio de País: México ante el Cambio Climático. Informe Técnico. México: U.S. Country Studies Program Support for Climate Change Studies, UNAM-Centro de Ciencias de la Atmósfera.
- INEGI, 2005. Carta de Uso de Suelo y Vegetación, Serie III (2002) y Serie IIIg (2002), escala 1:250 000 (Continuo nacional).
- INEGI, 2007. Conjunto de Datos Vectoriales Edafológicos, Serie III, escala 1:250 000 (Continuo nacional).

- Instituto Tecnológico de Sonora, 1996, Planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora. Convenio celebrado entre el Consejo Nacional de Ciencia Y Tecnología y El ITSON. Informe IX. Son., México.
- Instituto Tecnológico de Sonora, 1997, Alternativas para reducir la presencia de Fierro y Manganeso que exceda los límites establecidos en las normas para el agua potable, en el abastecimiento de la zona de Guaymas – Empalme. Comisión Nacional Del Agua. Gerencia de Agua Subterráneas. Informe Final. Cd. Obregón, Son., México.
- Instituto Tecnológico de Sonora, 2000, Estudio de disponibilidad y actualización hidrogeológica en los acuíferos de los valles de: El Yaqui, El Mayo, Boca Abierta y Guaymas, Sonora. Tomo I y Tomo II. Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Cd. Obregón, Sonora, México.
- Izquierdo, Juan, 1995. Programa FAO/PNUMA para el control de la desertificación: actividades y perspectivas, Oficial Regional Producción Vegetal, Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe.
- Kurc, 2008, Extreme makeovers: crossing critical thresholds into desertification, The University of Arizona, ALN No. 60.
- Lobo L., Universidad Central de Venezuela. Guía Metodológica para la delimitación del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe.
- López-Reyes, 2005, Elementos para el diseño de una política de uso sustentable de las tierras ganaderas de Sonora, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C.,
- Lozano-Cota, 1992, Un modelo de programación lineal para la planeación del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en el Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería, especialidad en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Martínez-Urbe, 1999, Caracterización hidrogeológica de las formaciones volcánicas y sedimentarias en el Valle de Boca Abierta, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería, especialidad en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.
- Martonne, E., 1926. L 'indice d'aridité. Bull Ass. Géogr. Fran. Vol. 9, pp. 3-5, París.
- MEA, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Desertification Synthesis, USA.

- Mercado-Mancera, Troyo-Diéguez, Aguirre-Gómez, Murillo-Amador, Beltrán-Morales, García-Hernández, 2010, Calibración y Aplicación del Índice de Aridez de Martonne para el Análisis del Déficit Hídrico como Estimador de la Aridez y Desertificación en Zonas Áridas. Publicación en Universidad y Ciencia, p. 51-64.
- Morales, C., Parada, S., 2005. Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Navarro-Ibarra, 2001, Modelo de optimización – simulación para generar políticas de extracción en el acuífero del Valle del Yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería, en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Sonora, México.
- Oropeza-Orozco, 1994. Evaluación de la vulnerabilidad a la desertificación, Instituto Nacional de Ecología.
- OSS, 2009. Sahara and Sahel Observatory, operating in Africa's Sahara-Sahel region, Tunis (Tunisia) 2000. Desertification and its effects on environment and agricultural production in Romania. Annals. Food Science and Technology.
- Pienaru, A., Iancu P., Cazanescu, S., 2009. Desertification and its effects on environment and agricultural production in Romania. USAMV Buc-FIFIM, Bd. Marasti, No. 59, Sector 1, Bucharest, Romania. Annals. Food Science and Technology.
- Pimenta M. T., Santos M., Rodrigues R., 1997. A proposal of indices to identify desertification prone areas. Institute for Water-INAG, Jornadas de reflexión sobre el Anexo IV de aplicación para el Mediterráneo Norte-Convenio de Lucha contra la Desertificación Murcia (España).
- Rangel Medina, López Ibarra, Hydrological consequences of climate variability and impact on sustainability of the two great basin in the northwest region of Mexico. Universidad de Sonora, Mexico-IDEAS S.C. Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca Noroeste.
- Recatalá-Boix, 2007. Desertificación: marco conceptual. Indicadores de desertificación, Centro de Investigaciones Sobre Desertificación, Universidad de Valencia.
- Rzedowski, J., 2006. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la biodiversidad, México., 1ra. Edición digital,
- Salinas-Zavala, Lluch-Belda, Hernández-Vázquez, Lluch-Cota, 1997. La Aridez en el Noroeste de México, un análisis de su variabilidad espacial y temporal, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.

- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (1981), Salinidad de los Suelos Agrícolas: Su Origen, Clasificación, Prevención y Rehabilitación, Boletín Técnico No. 10.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008. Informe sobre la Situación del Medio Ambiente en México, en su edición 2008, Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales (SNIARN).
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y Colegio de Postgraduados, 2003. Evaluación de la Degradación de los Suelos Causada por el Hombre en la República Mexicana, escala 1:250 000. Memoria Nacional 2001-2002.
- SGM, 2002. Carta Geológico-Minera: Guaymas (G12-2) y Ciudad Obregón (G12-3), escala 1: 250,000.
- SINADES, 2009. Estrategia Nacional de Manejo Sustentable de Tierras. Sistema Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Tazeh M., Ahmadi H., Azarnivand H., Ekhtesasei M.R., 2005. A research on technogenic desertification indices (case study: Yazd). Assist. Prof., Faculty of Natural Resources, Ardakan University, Ardakan Iran, Desert 17, p. 211-214.
- Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V., 1996, Estudio para el diseño de redes de monitoreo de los acuíferos de los valles de El Yaqui, Hermosillo y Caborca, en el Estado de Sonora. Elaborado para la Comisión Nacional Del Agua. Son., México.
- Técnicas Geológicas y Mineras, S.A. de C.V., 1997, Actualización de mediciones piezométricas de los acuíferos reactivados en 1996 (PROMMA), en los Estados de Sonora y Chihuahua. Elaborado para La comisión Nacional del Agua.
- Verón S.R., Paruelo J.M., Oesterheld M., 2005. Assessing desertification. Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección, IFEV A-Cátedra de Ecología, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires and CONICET. Journal of Arid Environments 66, p. 751-763.
- UNCCD, 1994. Texto final de la Convención Internacional de Lucha contra la Desertificación en los Países Afectados por Sequía Grave o Desertificación en particular en África.
- Vargas-Velázquez, 2007. Caracterización de los factores socioeconómicos de la desertificación en México, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Vidal-de los Santos, Franco-López, 2009, Impacto Ambiental Una Herramienta para el Desarrollo Sustentable, UNAM.

Zapuche-Moreno, 2000, Hidrogeoquímica de la franja costera del acuífero del Valle del yaqui, Sonora. Tesis de Maestría en Ingeniería, especialidad en Administración de Recursos Hidráulicos. ITSON, Cd. Obregón, Son., México.