



UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

HIDROGEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO SAN JOSÉ DE GUAYMAS, SONORA,
CON ÉNFASIS EN LA DETERMINACIÓN
DEL FRENTE DE INTRUSIÓN MARINA.

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

GEÓLOGA

PRESENTA:

DIANA AGLAEL ZAYAS AYÓN

DIRECTOR:

DR. MIGUEL RANGEL MEDINA



HERMOSILLO, SON.

ENERO DE 2015.

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



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

16 de diciembre, 2014

DR. MIGUEL RANGEL MEDINA
DIRECTOR DE TESIS
P R E S E N T E.-

Por este conducto le comunico que ha sido aprobado el tema de tesis propuesto por Usted intitulado:

**“HIDROGEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO SAN JOSÉ DE GUAYMAS, SONORA,
CON ÉNFASIS EN LA DETERMINACIÓN DEL FRENTE
DE INTRUSIÓN MARINA”**

Esto es con el fin de que la alumna **DIANA AGLAEL ZAYAS AYÓN** pueda presentar su examen profesional, para la obtención de su título de Licenciatura. Asimismo le comunico que han sido asignados los siguientes Sinodales:

M.C. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA	PRESIDENTE
M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZÁLEZ	SECRETARIA
DR. MIGUEL RANGEL MEDINA	VOCAL

Sin otro en particular y agradeciendo de antemano su atención al presente, quedo de Usted.

A T E N T A M E N T E

“EL SABER DE MIS HIJOS HARÁ MI GRANDEZA”

DR. I. GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO
JEFE DEL DEPARTAMENTO.



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Interesado
C.c.p. Archivo



"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Geología

NOMBRE DE LA TESIS:

**"HIDROGEOQUÍMICA DEL ACUÍFERO SAN JOSÉ DE GUAYMAS, SONORA,
CON ÉNFASIS EN LA DETERMINACIÓN DEL FRENTE
DE INTRUSIÓN MARINA"**

NOMBRE DEL SUSTENTANTE:

DIANA AGLAEL ZAYAS AYÓN

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

M.C. FRANCISCO JAVIER GRIJALVA NORIEGA

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

M.C. ALEJANDRA MONTIJO GONZÁLEZ

El que suscribe, certifica que ha revisado esta tesis y que la encuentra en forma y contenido adecuado, como requerimiento parcial para obtener el Título de Licenciatura en la Universidad de Sonora.

DR. MIGUEL RANGEL MEDINA

**ATENTAMENTE
"EL SABER DE MIS HIJOS HARA MI GRANDEZA"**

**DR. I. GUADALUPE ESPINOZA MALDONADO
JEFE DEL DEPARTAMENTO**



El saber de mis hijos
hará mi grandeza
**DEPARTAMENTO
DE GEOLOGIA**

C.c.p. Archivo.



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. LOS ACUÍFEROS COSTEROS.....	1
1.2. VULNERABILIDAD DE SU USO	2
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. CONCEPTUALIZACIÓN DEL BOMBEO EN ZONAS COSTERAS ALUVIALES..	3
2.2. ANÁLISIS TEÓRICO DE ACUÍFEROS COSTEROS	3
2.3. LA INTRUSIÓN MARINA EN ACUÍFEROS CÓSTEROS	4
2.4. GESTIÓN Y NORMATIVIDAD DE ACUÍFEROS COSTEROS EN MÉXICO	6
3. ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	7
3.1. PLANTEAMIENTO DE ESTUDIO.....	7
3.2. OBJETIVO.....	7
3.3. METAS ESPECÍFICAS	7
3.4. HIPÓTESIS.....	8
3.5. JUSTIFICACIÓN.....	8
3.6. METODOLOGÍA	9
3.7. RECOPIACIÓN, INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN DISPONIBLE	10
4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO	16
4.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	16
4.1.1 SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ACUÍFERO	19
4.2. FISIOGRAFÍA	20
4.3. CLIMATOLOGÍA.....	21
4.3.1. Tipo de Clima.....	21
4.3.2. Precipitación	23
4.3.3. Precipitación histórica	24
4.3.4. Temperatura.....	27
4.3.5. Evaporación.....	28
4.3.6. Evapotranspiración Real.....	33
4.4. HIDROLOGÍA	29
4.5. GEOMORFOLOGÍA	31
4.6. GEOLOGÍA.....	34
4.6.1. Tectónica Regional	34
4.6.2. Estratigrafía	36
4.7. HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA.....	43
4.7.1. Actualización Piezométrica.....	43
4.7.2. Profundidad del Nivel Estático.....	47
4.7.3. Elevación del Nivel Estático.....	51



4.7.4. Evolución de Nivel Estático	56
5. INTEGRACIÓN DE LA GEOLOGÍA DEL SUBSUELO	62
5.1. SONDEOS ELECTRO-MAGNÉTICOS EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	62
5.1.1. Método Electromagnético	62
5.2. EJECUCIÓN E INTERPRETACIÓN DE GRAVIMETRÍA	64
5.3. INTERPRETACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	71
5.3.1. Perfiles de resistividad	71
5.3.2. Mapas de resistividad y Modelo Geofísico	81
5.3.3. Modelos de penetración de la zona de interfase	85
6. HIDROGEOQUÍMICA Y MUESTREO DE AGUAS PARA ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS.....	87
6.1. MUESTREO HIDROGEOQUÍMICO	87
6.2. MUESTREO ISOTÓPICO	90
6.3. BALANCE DE ANIONES Y CATIONES (BALANCE IÓNICO).	93
6.4. INTEGRACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS (2008-2012)	96
6.4.1. Hidroggeoquímica.	96
6.4.1.1. Caracterización Hidroggeoquímica. Diagramas Hidroquímicos.....	96
6.4.1.2. Cloruros.....	106
6.4.1.3. Conductividad Eléctrica	110
6.4.1.4. Sólidos Totales Disueltos.....	113
6.4.1.5. Fluoruros	118
6.4.1.6. Magnesio.	121
6.4.1.7. Bromuros.....	124
6.4.1.8. Sodio.....	127
6.4.1.9. Bicarbonatos	131
6.4.1.10. Calcio	134
6.4.2. Caracterización Isotópica de las Aguas.....	138
6.5. APLICACIÓN DE ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS.....	140
7. MODELOS CONCEPTUALES.....	151
7.1 MODELO DE LA ZONA DE INTERFASE	151
7.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO	153
7.2.1 Unidades Hidrogeológicas	153
7.2.2 Modelo Hidrogeológico.....	155
7.3. MODELO HIDROGEOQUÍMICO.....	158
7.3.1. Zona de interfase.....	159
7.3.2. Zona de mezcla	160



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	163
--	------------

BIBLIOGRAFIA.	166
---------------------------	------------

CONTENIDO DE TABLAS

4.1. Límite administrativo del acuífero San José de Guaymas.....	16
4.2. Estaciones climatológicas en la cuenca Río Mátape.....	23
4.3. Record histórico de precipitación por efecto de huracanes en México.....	27
5.1. Coordenadas de los Sondeos electromagnéticos realizados.	64
5.2. Densidades utilizadas en la modelación de los perfiles	71
5.3. Unidades resistivas interpretadas dentro del área estudiada.....	73
6.1. Parámetros Físico-químicos obtenidos en campo	90
6.2. Datos de campo	91
6.3. Tabla de aniones y cationes para la fórmula del balance iónico	93
6.4. Resultados del balance iónico de 2012.	94
6.5. Resultados del balance iónico de 2009.	94
6.6. Resultados del balance iónico de 2008	95
6.7. Clasificación del agua según la IDA.....	114
6.8. Resultados del Análisis Isotópico.....	138
6.9. Relaciones de rCl/rBr de 2008	141
6.10. Relaciones de rCl/rBr de 2009.....	142
6.11. Relaciones de rCl/rBr de 2012.....	143
6.12. Relaciones de rCl/rHCO ₃ (1998)	145
6.13. Relaciones de rCl/rHCO ₃ de 2008.....	147
6.14. Relaciones de rCl/rHCO ₃ (2009)	148
6.15. Relaciones de rCl/rHCO ₃ de 2012	149



CONTENIDO DE FIGURAS

2.1. Equilibrio agua dulce – agua salada	5
3.1. Metodología para la toma de muestra de agua.....	9
4.1. Localización del acuífero San José de Guaymas.....	18
4.2. Fisiografía del acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).....	21
4.3. Tipos de clima en el acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).....	22
4.4. Precipitación media anual, estación Empalme Observatorio (CEA, 2012) ..	24
4.5. Isoyetas en la cuenca baja del Río Mátape del 2 al 4 de septiembre de 2009 (Fuente: CONAGUA)	25
4.6. Hietograma Ciclón Jimena, Observatorio Empalme (Fuente: CONAGUA)...	26
4.7. Temperatura media en la estación Empalme Observatorio, en la región de San José de Guaymas 1980 – 2009 (CEA, 2012)	28
4.8. Ubicación del acuífero de San José de Guaymas dentro de la cuenca del Río Mátape (CEA, 2012)	30
4.9. Hidrografía del acuífero de San José de Guaymas (CEA, 2012).....	31
4.10. Geomorfología del acuífero San José de Guaymas (IDEAS, 2009)	33
4.11. Geología del Acuífero administrativo de San José de Guaymas (IDEAS, 2009)	37
4.12. Columna estratigráfica del acuífero (IDEAS, 2009).....	38
4.13. Localización aprovechamientos censados (IDEAS, 2009).....	45
4.14. Tipos de Aprovechamientos.....	46
4.15. Usos del agua	46
4.16. Profundidad al nivel estático, 2009 (m). Fuente IDEAS, 2009	48
4.17. Evolución de la profundidad al nivel estático (m). Fuente IDEAS, 2009...	49
4.18. Profundidad al nivel estático 2010.....	50
4.19. Profundidad al nivel estático 2011.....	50
4.20. Elevación del nivel estático y dirección de flujo subterráneo 2009. Fuente IDEAS, 2009.....	53
4.21. Evolución de la elevación al nivel estático (m.s.n.m.). Fuente IDEAS, 2009	54
4.22. Elevación del nivel estático y dirección de flujo subterráneo, Octubre 2011	55
4.23. Evolución del nivel estático para diferentes periodos (Fuente IDEAS, 2009)	58
4.24. Evolución del nivel estático en el periodo 1995 – 2005 (Fuente IDEAS, 2009)	59



4.25. Evolución del nivel estático en el periodo 1995 – 2009 (Fuente IDEAS, 2009)	60
4.26. Evolución del nivel estático en el periodo 2009-2011	61
5.1. Mapa de distribución de TEM's exploratorios en el área de estudio (CEA, 2012)	63
5.2. Aumento de la gravedad debido a la presencia del basamento en el subsuelo	64
5.3. Localización de estaciones gravimétricas dentro del acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012)	65
5.4. Plano de Anomalía de Bouguer integrado en el Acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012)	67
5.5. Plano de Anomalía Residual integrado del Acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012)	68
5.6. Plano de Anomalía Residual donde se muestra la distribución de los perfiles modelados (CEA, 2012)	70
5.7. Localización de perfiles de resistividad (ITSON, 2008 y CEA, 2012)	72
5.8. Perfil de Resistividad WE-02 (CEA, 2012)	75
5.9. Perfil de Resistividad SN-02 (CEA, 2012)	77
5.10. Perfil de Resistividad SN-05 (CEA, 2012)	79
5.11. Perfil de Resistividad WE-03 (CEA, 2012)	80
5.12. Resistividad a diferente elevación en la zona sur del acuífero San José de Guaymas (CEA 2012)	83
5.13. Modelo geofísico (CEA, 2012)	84
5.14. Localización de TEM realizados en el área de estudio y delimitación de zona de intrusión salina (CEA, 2012)	86
6.1. Distribución del Muestreo de aguas subterráneas para análisis físico-químico	88
6.2. Distribución del muestreo de aguas subterráneas para determinación de Isótopos Estables	92
6.3. Diagrama de Piper (2008)	97
6.4. Diagrama de Piper (2009)	98
6.5. Diagrama de Piper (2012)	99
6.6. Diagrama de Durov (2008)	100
6.7. Diagrama de Durov (2009)	101
6.8. Diagrama de Durov (2012)	102
6.9. Diagrama de Stiff (2008)	103
6.10. Diagrama de Stiff (2009)	104
6.11. Diagrama de Stiff (2012)	105
6.12. Distribución de isovalores de Cloruro (ITSON, 2008)	108



6.13. Distribución de isovalores de Cloruro (IDEAS, 2009)	109
6.14. Distribución de isovalores de Cloruro (CEA, 2012)	110
6.15. Distribución de isovalores de Conductividad Eléctrica (ITSON, 2008).....	111
6.16. Distribución de isovalores de Conductividad Eléctrica (IDEAS, 2009)	112
6.17. Distribución de isovalores de Conductividad Eléctrica (CEA, 2012)	113
6.18. Curvas de Isovalores de Sólidos Totales Disueltos (ITSON, 2008)	115
6.19. Isovalores de Sólidos Totales Disueltos (IDEAS, 2009)	116
6.20. Isovalores de Sólidos Totales Disueltos (CEA, 2012)	118
6.21. Isovalores de Fluoruros (ITSON, 2008).....	119
6.22. Isovalores de Fluoruros (IDEAS, 2009)	120
6.23. Isovalores de Fluoruros (CEA, 2012)	121
6.24. Isovalores de Magnesio (ITSON, 2008).....	122
6.25. Isovalores de Magnesio (IDEAS, 2009)	123
6.26. Isovalores de Magnesio (CEA, 2012)	124
6.27. Isovalores de Bromuros (ITSON, 2008)	125
6.28. Isovalores de Bromuros (IDEAS, 2009).....	126
6.29. Isovalores de Bromuros (CEA, 2012)	127
6.30. Isovalores de Sodio (ITSON, 2008)	128
6.31. Isovalores de Sodio (IDEAS, 2009).....	130
6.32. Isovalores de Sodio (CEA, 2012)	131
6.33. Isovalores de Bicarbonatos (ITSON, 2008).....	132
6.34. Isovalores de Bicarbonatos (IDEAS, 2009)	133
6.35. Isovalores de Bicarbonatos (CEA, 2012)	134
6.36. Isovalores de Calcio (ITSON, 2008).....	135
6.37. Isovalores de Calcio (IDEAS, 2009)	136
6.38. Isovalores de Calcio (CEA, 2012)	137
6.39. Zonificación de Aguas a partir de contenido de ^2H y ^{18}O	139
6.40. Relaciones de $r\text{Cl}/r\text{Br}$ (2008).....	142
6.41. Relaciones de $r\text{Cl}/r\text{Br}$ (2009).....	143
6.42. Relaciones de $r\text{Cl}/r\text{Br}$ (2012).....	144
6.43. Relaciones de $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ (1998)	145
6.44. Relaciones de $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ (2008)	148
6.45. Relaciones de $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ de 2009	149
6.46. Relaciones de $r\text{Cl}/r\text{HCO}_3$ de 2012	150
7.1. Modelo de la Zona de Interfase para la región estudiada (CEA, 2012).....	152
7.2. Modelo Conceptual Hidrogeológico del Acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).....	157
7.3. Modelo Hidrogeoquímico ($r\text{Cl}/\text{Br}$) del Acuífero San José de Guaymas	161
7.4. Modelo Hidrogeoquímico ($r\text{Cl}/\text{HCO}_3$) del Acuífero San José de Guaymas...	162



1. INTRODUCCIÓN

1.1 Los Acuíferos Costeros

La comprensión de las relaciones agua dulce-agua salada es compleja, pues las dificultades inherentes al estudio del agua subterránea, se suma la existencia de agua de densidad diferente y miscible, con diferencias de viscosidad y a veces de temperatura. http://www.bdigital.unal.edu.co/4993/5/Capitulos_10-15.pdf.

Los acuíferos costeros presentan algunas peculiaridades que tienen notable incidencia en su régimen hidrodinámico, en su modo de explotación, en los riesgos potenciales de contaminación y en las precauciones que deben tomarse para su preservación. Sin duda, su carácter de costero tiene su principal definición en que se encuentran en contacto con el mar, pero también existen otras características asociadas que les confieren habitualmente (no siempre) especiales condiciones; estas características se presentan a continuación:

- a) Suelen recibir alimentación lateral subterránea.
- b) La demanda hídrica suele ser elevada debido a que se desarrolla intensa actividad agrícola (si la climatología es adecuada).
- c) El mar representa un límite de potencial constante (cero).
- d) El flujo se dirige aproximadamente normal a la línea de costa.
- e) La explotación suele provocar descensos piezométricos bajo el nivel del mar.
- f) Como consecuencia de lo anterior, son frecuentes las situaciones de salinización por intrusión marina.
- g) En la franja mediterránea, las características paleogeográficas suelen acarrear la presencia de acuitardos con aguas connatas. <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionHQ23.pdf>



1.2 Vulnerabilidad de su Uso

El término vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, se usa para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster 1987).

La vulnerabilidad ha sido definida por diversos autores. En la mayoría de los casos se distingue la vulnerabilidad específica (o integrada) de la vulnerabilidad intrínseca (interna o natural para algunos autores). La vulnerabilidad intrínseca viene representada por las características del entorno del acuífero (geológicas, hidrogeológicas, climáticas, biológicas) que determinan la sensibilidad del agua subterránea a la contaminación por la actividad humana. En cambio la vulnerabilidad específica define la vulnerabilidad del agua subterránea a un contaminante o grupo de contaminaciones concreto, relacionándose las propiedades del contaminante con la vulnerabilidad intrínseca (Daly *et al.*, 1997). (Los acuíferos costeros volúmenes 1-2 – Prospección eléctrica y vulnerabilidad a la contaminación en el acuífero de Ghis-Nekor, Marruecos).

Los acuíferos costeros, uno de los procesos de contaminación más frecuentes es la salinización de sus aguas por el avance del agua de mar tierra adentro, fenómeno que se conoce con el nombre de intrusión marina. En estos acuíferos costeros que vierten sus aguas directamente al mar, se crea un estado de equilibrio entre el flujo de agua dulce y el flujo de agua salada, que sólo sufre modificaciones naturales a muy largo plazo debidas a cambios climáticos o movimientos relativos de la tierra y el mar.



2. MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptualización del Bombeo en Zonas Costeras Aluviales

Cuando se modifican las condiciones naturales, bien por incremento del flujo de agua dulce debido a fuertes lluvias o a recargas inducidas (recarga artificial, riego con aguas superficiales, etc.), o bien por disminución de ese mismo flujo debido esencialmente a bombeos en el acuífero, el equilibrio agua dulce - agua salada, se desplaza en un sentido u otro.

La intrusión se produce en este último caso, cuando las extracciones de agua subterránea hacen disminuir el flujo de agua dulce y el agua de mar invade el continente. Desde el punto de vista hidrodinámico la intrusión marina tiene lugar básicamente cuando los niveles dinámicos y/o estáticos en el interior del continente se sitúan por debajo del nivel del mar. La experiencia demuestra que una vez que se produce el aumento de la salinidad, el proceso evoluciona con extrema rapidez y su vuelta al estado de equilibrio puede requerir mucho tiempo. http://www.bdigital.unal.edu.co/4993/5/Capitulos_10-15.pdf.

2.2 Análisis Teórico de Acuíferos Costeros

De forma sencilla, se puede definir un acuífero costero como aquella formación geológica capaz de almacenar agua y transmitirla, es decir, que puede moverse a través del mismo, pero con la característica particular de que está conectado hidráulicamente con el mar, y en una mayoría de casos algunos de sus límites puede estar a su vez relacionados hidráulicamente con otros acuíferos del interior. De esta forma se pueden considerar como el último eslabón en el ciclo natural del agua, en su variante subterránea, puesto que reciben agua de otros acuíferos, de aguas superficiales o de lluvia directamente, para devolverla finalmente al mar. (LA INTRUSIÓN MARINA Y SU INCIDENCIA EN LOS ACUÍFEROS ESPAÑOLES - Juan Antonio López-Geta (*) y Juan de Dios Gómez-Gómez (**)).



Los acuíferos costeros constituyen embalses subterráneos, del más variado volumen, donde el agua circula muy lentamente, cm/día en los más superficiales a cm/año en los profundos.

Estos acuíferos se pueden agrupar en dos grandes tipos:

- Acuíferos no consolidados detríticos, están constituidos por gravas y arenas de cauces de arroyo y fluviales meandriiformes o trenzados. Limos y arcillas ocupan las llanuras de inundación procedentes de la erosión y transporte de los relieves circundantes.
- Acuíferos consolidados carbonatados. En ellos el agua además de los intersticios entre granos, ocupa los huecos creados por la fracturación de la roca y los originados por procesos de disolución de la caliza y diagénesis en la dolomitización. (Acuíferos costeros e intrusión marina – Fernando Pendás Fernández).

Una característica esencial de los acuíferos costeros es la coexistencia de dos fases físicoquímicas diferentes: agua dulce y agua salada, estos son fluidos de densidad, temperatura y viscosidad diferente y, desde luego, muy diferente composición química. Se debe presumir la existencia de un límite de separación entre ambas, denominado interfase, si bien la miscibilidad entre el agua dulce y el agua salada no permite que esta interfase sea neta, sino que, realmente, da lugar a una zona de mezcla, de difusión o de transición, de anchura variable que depende esencialmente de las variaciones del nivel piezométrico, del espesor del acuífero y de la permeabilidad del entorno costero.

2.3 La Intrusión Marina en Acuíferos Costeros

En un acuífero costero, existe una relación de equilibrio natural entre el agua subterránea dulce del acuífero que descarga al mar y el agua salada de origen marino que pugna por penetrar tierra adentro (Custodio, 1995 y 2004), y que usualmente lo hace en forma de cuña apoyada en la base del acuífero dada su mayor densidad (Figura 2.1).

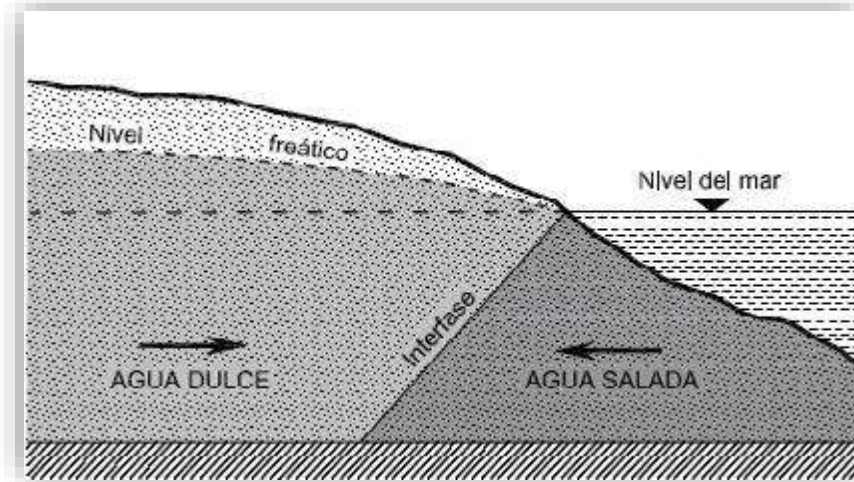


Figura 2.1. Equilibrio agua dulce – agua salada.

Este equilibrio natural puede verse alterado por la acción humana al modificar la descarga de agua dulce al mar, fundamentalmente debido a extracciones por bombes del acuífero, provocando un descenso de la superficie piezométrica y en consecuencia la penetración de la cuña de agua marina tierra adentro. Otras modificaciones del ciclo hidrogeológico, que alteren las entradas en el acuífero, como por ejemplo la construcción de presas en el cauce de un río que alimente un acuífero, pueden también alterar el equilibrio agua dulce - agua salada. Se puede definir por tanto, la intrusión marina, como el movimiento permanente o temporal del agua salada tierra adentro, desplazando al agua dulce, como consecuencia de una disminución del flujo de agua dulce hacia el mar debido a la intervención humana. Esta intrusión provocará el aumento de la salinidad en las aguas subterráneas con la consiguiente contaminación del acuífero costero y la limitación de su aprovechamiento para determinados usos.

Existen otros mecanismos de salinización diferentes de la intrusión marina, que pueden producirse individualmente o acompañar a la intrusión, como la disolución de sales y lixiviado de minerales, evaporación, mezcla con otras aguas salinizadas procedentes de pasados procesos de intrusión o presencia de aguas congénitas asociadas a los sedimentos de origen marino, vertidos industriales, etc.



2.4 Gestión y Normatividad de Acuíferos Costeros en México

Normas establecidas para los acuíferos costeros:

- NOM-022-SEMARNAT-2003. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar.
- NOM-014-CONAGUA-2003. Norma Oficial Mexicana que constituye los requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.
- NOM-015-CONAGUA-2007. Norma Oficial Mexicana que propone la infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.



3. ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

3.1 PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

El presente trabajo pretende hacer una visualización de la calidad del agua y determinar el frente de intrusión marina del estero El Rancho, perteneciente al acuífero San José de Guaymas, donde haciendo uso de diagramas Hidroquímicos, Isotopía y Geofísica, se obtiene así el quimismo del agua, la gravimetría y sondeos electromagnéticos que pueden generar resultados claramente visibles, mismos que se plasman en modelos.

3.2 OBJETIVO

Caracterizar al acuífero San José de Guaymas en la porción del estero El Rancho, en base a la química del agua subterránea, apoyándose en trabajos realizados en los años 2008 (ITSON), 2009 y 2012 (IDEAS, CEA) por diversos autores, con el objetivo de determinar las calidades del agua y la geometría de la intrusión marina definiendo la posición del frente de intrusión, comparado con la citada en 2008, donde se habló de mayor desarrollo producido por bombeo.

3.3 METAS ESPECÍFICAS

- Utilizar distintos diagramas hidroquímicos para visualizar cual es el más correcto para la zona de estudio.
- Utilizar relaciones hidroquímicas para determinar el tipo de agua.
- A partir de las relaciones hidroquímicas generar modelos para visualizar las zonas de mezcla e interfase.



3.4 HIPÓTESIS

- El acuífero San José de Guaymas presenta intrusión marina natural, es decir, no inducida por bombeo.
- Corroborar si existe en si una intrusión marina inducida por sobrebombeo y que haya una penetración hacia el continente.
- En caso de no cumplirse el punto anterior, comprobar que la alta salinidad en la zona se debe a eventos hidrometeorológicos extraordinarios, que a su vez alteran y hacen penetrar agua marina temporalmente hacia el acuífero.

3.5 JUSTIFICACIÓN

Existe una duda importante con relación al bombeo que se realiza en esta zona del estero El Rancho que ha inducido intrusión marina. El presente estudio de tesis se justifica para poder contar con una herramienta científica y determinar si está o no siendo afectado por intrusión marina antropogénica.



3.6 METODOLOGÍA

Para el estudio de esta tesis lo más relevante fueron las obtenciones de las muestras de agua para los análisis físico-químicos e isotópicos. La siguiente figura 3.1 muestra los pasos a seguir para una buena obtención de la toma de una muestra de agua, siendo en este caso, muestras de agua subterránea.

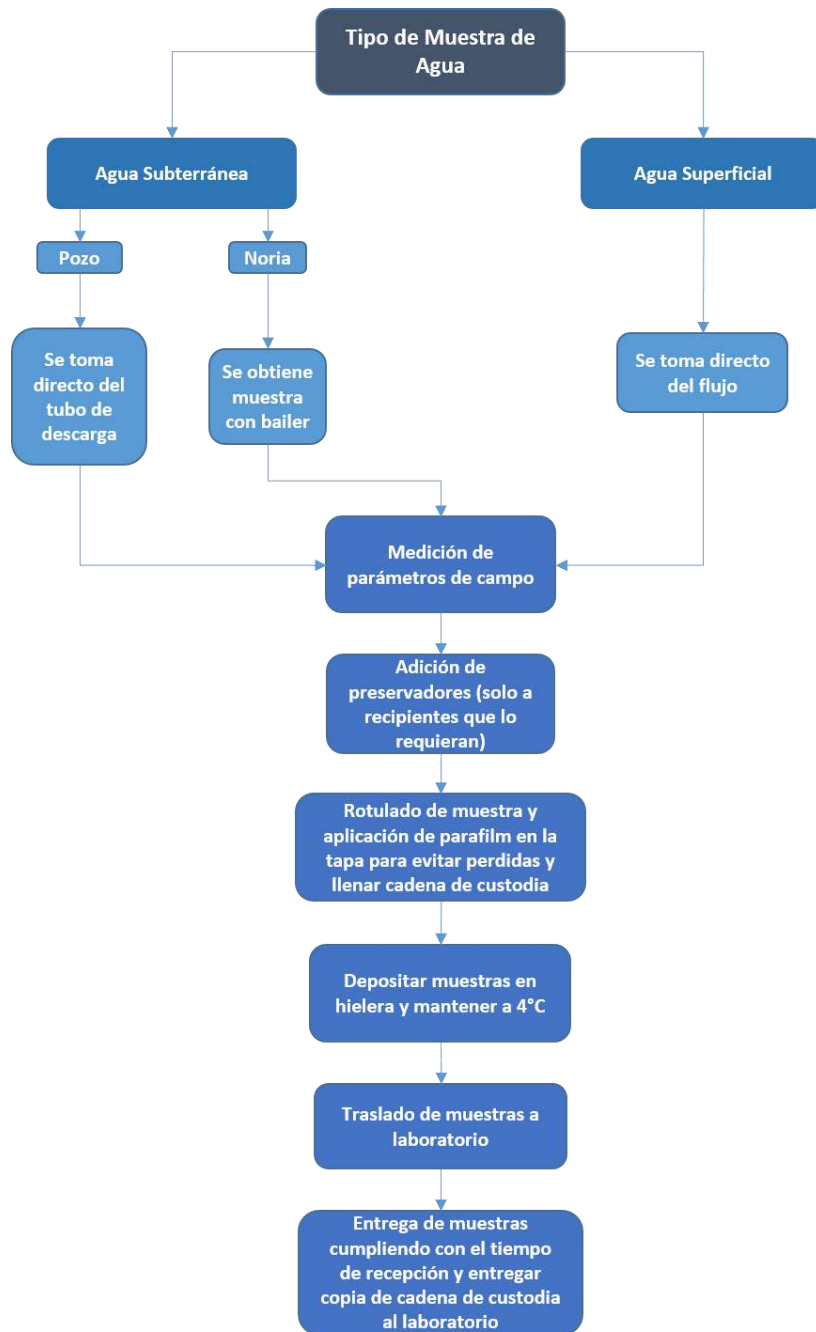


Figura 3.1. Metodología para la toma de muestra de agua.



3.7 Recopilación, Integración y Análisis de información disponible

En el acuífero San José de Guaymas se han realizado varios estudios hidrogeológicos, los cuales fueron proporcionados por varias instituciones como la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Comisión Estatal del Agua (CEA), Universidad de Sonora (UNISON) e Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS) entre otros. Los estudios consultados se enlistan a continuación:

- *"Interpretación de datos y determinación del potencial actual del acuífero en la costa de Guaymas, Sonora."* *Técnicas Modernas de Ingeniería, S. A. Diciembre 1975.* El estudio concluye en la gravedad del problema del abastecimiento de agua para las poblaciones de Guaymas y Empalme y de los desarrollos turísticos e industriales establecidos en sus inmediaciones, pues los pozos que suministran el agua para estos usos, ubicados en el Valle de Guaymas y en el de San José de Guaymas, serán inutilizados en corto tiempo por la intrusión, y habrá necesidad de reponerlos a distancias cada vez mayores de los sitios de demanda.
- *"Ampliación al Estudio Geofísico del Valle de Guaymas, Sonora". Instituto de Geofísica de la Universidad Autónoma de México (UNAM), 1985.* El estudio presenta secciones geofísicas del área del Valle de Guaymas, pero no contiene texto ni conclusiones.
- *"Ampliación de la modelación Matemática de las fuentes de Abastecimiento para el suministro de agua en bloque a las ciudades de Guaymas, Empalme y San Carlos, Sonora". Instituto de Geofísica UNAM. 1985. Agosto 1985.* La principal conclusión del estudio es que los acuíferos explotados están sufriendo salinización debido a la intrusión de agua de mar, acelerada por el crecimiento de los gradientes de carga piezométrica. Si se continúa el régimen de explotación actual, para el año 2010 la mitad de los acuíferos de San José de Guaymas, del Valle de Guaymas y la tercera parte del de Cruz de Piedra habrán sido invadidos por agua salada dada su cercanía con el mar (en este caso la zona baja de manglares que inunda la marea).
- *"Dictamen Geohidrológico Valle San José de Guaymas, municipio de Guaymas, Sonora". Reporte Interno Comisión Nacional del Agua, 1986.* Las conclusiones del estudio son: El acuífero actualmente es explotado por 144 aprovechamientos hidráulicos subterráneos, extrayendo un total de 10.9 millones de m³ al año; la recarga



calculada en estudios realizados es de 4.5 millones de m³; el desequilibrio extracción-recarga ha originado una inversión de flujo y con ello la intrusión marina, y de los estudios de geofísicos realizados por S.I.D.U.R. se han detectado en la parte norte de la zona de explotación una litología subterránea con buena permeabilidad y transmisibilidad.

- *"Informe Geohidrológico sobre El Valle de San José de Guaymas". Jefatura Del Programa Hidráulico Residencia de Geohidrológica y de Zonas Áridas, 1986.* El estudio determinó que el relleno aluvial del Valle de San José de Guaymas lo forma El Arroyo de San José de Guaymas, cuyo drenaje de tipo dendrítico cuenta con el arroyo del Tigre como principal afluente. También se encuentran en el subsuelo depósitos marinos correspondientes al Mioceno, periodo geológico en que el Valle estaba inundado por el mar. Este depósito marino lo constituye una arcilla azul de extensión horizontal no determinada, considerándose en una fase de consolidación como una lutita, la cual origina una carga hidrostática en algunas aéreas del Valle, lo que lleva a considerar la existencia de dos acuíferos parcialmente comunicados. De los pozos profundos existentes en el Valle, los que extraen el mayor volumen explotan aguas de los dos acuíferos, por los que no se puede considerar al acuífero inferior como una reserva, dado que se ha detectado una contaminación salina de tipo marino en los dos acuíferos en las aguas de los pozos cercanos al litoral.
- *"Sistema de Abastecimiento de Agua Potable para las Poblaciones de Guaymas, Empalme y San Carlos. SARH, 1993.* El sistema de abastecimiento de agua potable para las poblaciones de Guaymas, Empalme y San Carlos, está constituido por cuatro zonas de captación a las cuales se les identifica por el nombre del lugar de la fuente: Río Yaqui, Boca abierta, Ejido Maytoarena y Ejido San José de Guaymas. Al operar las cuatro zonas al mismo tiempo se aprovecha un gasto total de 1,514 l/s, aportado por 26 pozos de los cuales tres aún no operan. El contenido de sales ponderado del agua conducida por todo el sistema de abastecimiento se manifiesta con 811 ppm de sales solubles totales (Conductividad eléctrica de 1,231 micromhos/cm). Sin embargo puede disminuir a 525 ppm con un gasto de 1,360 l/s, eliminando 3 pozos que se encuentran en la zona del ejido San José de Guaymas, que presentan sales solubles totales que varían entre 3,900 y 5600 ppm.



- *"Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero San José de Guaymas, Sonora". Comisión Nacional del Agua, Abril del 2002.* Este es el informe de disponibilidad publicado por la CONAGUA. Se consideró una recarga total media anual de 4.5 Mm³, se consideró nula la descarga natural comprometida, y el volumen concesionado fue de 19.22 Mm³/año. De esta manera, la disponibilidad de aguas calculada fue de -14.72 Mm³/año. No se calculó la pérdida por evapotranspiración en niveles someros, ni celdas de flujo horizontal.
- *"Aplicación de diferentes Métodos para estudiar la Intrusión Salina en Acuíferos de Sonora, México". José Castillo Gurrola, 2003.* Se han aplicado diferentes métodos para el estudio de la intrusión salina en los acuíferos costeros del estado de Sonora, México. Los métodos son los siguientes: geoquímicos, con énfasis en los análisis de cloruros y bromuros; conductividad eléctrica en pozos; geofísicos como los de resistividad eléctrica verticales (SEV), Transitorio Electromagnético (TEM) y gravimetría (complementario); matemáticos utilizando el modelo SHARP, e hidrodinámicos estudiando la evolución de la piezometría y gradientes hidráulicos.
- *"Unidades Geohidrológicas y familias de agua de la Subcuenca arroyo Guaymas, Sonora". Boletín del Departamento de Geología, UNISON, 2005.* En el estudio se proponen tres unidades geohidrológicas para la parte baja de la Subcuenca Arroyo Guaymas. Los análisis químicos realizados a muestras de agua subterránea permiten agruparlas en las familias: Ca-Mg SO₄-Cl, Na Cl-SO₄, Na-HCO₃ y mixtas, según las clasificaciones de Piper y Stiff. La mayor parte de las muestras provienen del acuífero de San José de Guaymas, en la porción oriental del área estudiada, el cual está sobreexplotado y cuya agua ha sido contaminada por intrusión salina. Se encontró que en algunos sitios el cloruro y los sólidos totales disueltos exceden los límites máximos permisibles para agua potable.
- *"Estudio de Evaluación Geofísica e Hidrogeoquímica del avance de la intrusión salina en el Acuífero de San José de Guaymas, Sonora",* realizado por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) en el año 2008. El estudio está encaminado a la conservación, mantenimiento y manejo sustentable del acuífero de San José de Guaymas.



- *"Estadísticas del agua en el Estado de Sonora. Edición 2008". Comisión Estatal del Agua.* La Comisión Estatal del Agua (CEA) presenta la primera edición del libro Estadísticas del Agua del Estado de Sonora 2008, con el objeto de proporcionar al público interesado información confiable sobre la situación que guarda el agua en el Estado y su interrelación con los aspectos sociales, económicos y ambientales.
- *"Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del Estado de Sonora". Amelia Reyes Martínez. Revista Digital Universitaria, Agosto del 2009.* La fuerte sobreexplotación y el abatimiento año tras año de los niveles piezométricos en los acuíferos de la Región Noroeste, ha provocado la contaminación del agua por intrusión salina, afectando a varios aprovechamientos que se localizan a lo largo de la franja costera, los cuales se encuentran deshabilitados y una gran extensión de superficie agrícola se encuentra ensalitrada y abandonada. Estos fuertes problemas ambientales han generado también una baja rentabilidad de la actividad agrícola que se desarrolla en tres importantes distritos de riego del estado de Sonora: Altar-Pitiquito-Caborca, Costa de Hermosillo y Guaymas. Para lograr un equilibrio hidrológico de estos acuíferos y reactivar la agricultura en la zona, las autoridades federales y estatales, en conjunto con los productores han tenido que llevar a cabo una serie de medidas de gran importancia, dentro de las cuales se encuentran: programas anuales de reducción del bombeo, reducción de la superficie regada, reconversión productiva y la tecnificación de los sistemas de riego en áreas destinadas en un gran porcentaje a los cultivos perennes. Estas acciones en conjunto están orientadas a lograr una eficiencia en el manejo y aprovechamiento del agua subterránea destinada al riego en la zona.
- *"Relevancia de escenarios Neotectónicos y estructurales del Golfo de California, en el control Hidrogeológico de los acuíferos costeros del Noroeste de México".* Rangel Medina et al. en 2012 presentan una recopilación de estudios hidrogeológicos realizados en los acuíferos costeros del Pacífico Norte Mexicano; para lo cual los autores utilizaron análisis de imágenes LANDSAT, sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM'S), anomalías de gravedad y perfiles litológicos de pozos. Como principales resultados, los autores obtuvieron mapas tridimensionales del basamento cristalino con ayuda de gravimetría, asociándolos como parte del Batolito Larámide de Sonora; con una alternancia de fosas tectónicas (grabens) y bloques



elevados (horsts) sensiblemente orientados NW-SE, que alcanzan profundidades de 1500 metros. La relevancia hidrogeológica de estas estructuras mayores radica en que presentan fracciones de fosas tectónicas que, a manera de canales de alta permeabilidad, facilitan el proceso de intrusión marina hacia el continente. Se caracterizaron la geoquímica del agua salina y dulce, su relación recarga-descarga, así como el proceso de migración de la pluma y sus relaciones hidrotectónicas en las planicies costeras del Desierto de Sonora. Los resultados integran un nuevo modelo hidrogeológico que explica la posición de la intrusión salina en los acuíferos costeros, muestran que en los acuíferos continentales existe penetración marina moderna y por su posición estratigráfica sobre arcillas, producto de la transgresión marina del Mioceno, resultante del proceso de apertura del Golfo de California, bajo condiciones de sobreexplotación pueden recibir flujo subterráneo de origen marino pre-moderno ascendente y con ello limitan las condiciones hidrogeológicas para explotar agua subterránea salobre con pozos.

- *"Estudio previo justificativo para el establecimiento del Área Natural Protegida Monumento Natural Estero El Soldado, Sonora México"*, Estudio realizado por la Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES) y la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP), en el cual tiene como finalidad, proponer al Estero El Soldado como Área Natural Protegida (ANP) bajo la categoría de Monumento Natural, ya que esto permitirá conservar, proteger y restaurar la biodiversidad existente, conservar los valores paisajísticos, propiciar el desarrollo de actividades de investigación y monitoreo científico sobre los recursos naturales del área, y promover el cambio de actitud hacia la conservación de los recursos naturales de la comunidad de Guaymas y de los visitantes al sitio. La propuesta de Monumento Natural incluye una superficie total del área de 290 ha., de las cuales se propone una zona núcleo (ZN) con 231 ha. y una de amortiguamiento de 59 ha., 80% y 20% de la superficie total respectivamente.
- *"Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del Río Mátape y sus acuíferos Mátape, Valle de Guaymas y San José de Guaymas."* Ruiz (2008) realizó una actualización del balance hídrico integral de la cuenca del río Mátape y sus acuíferos (Mátape, Valle de Guaymas y San José de Guaymas). El objetivo general del trabajo fue determinar la



disponibilidad media de agua (1982-2005) para una planeación y utilización adecuada del recurso. En opinión del autor, si se sigue con este régimen de explotación los acuíferos del área habrán desaparecido por completo, ya que hasta la fecha el Valle ha perdido 30 km de tierra fértil por la intrusión salina, desde la costa, según el resultado del análisis de calidad del agua efectuado en 2007. Entre las conclusiones están las siguientes: el acuífero del Valle de Guaymas está sobre concesionado en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA) por 114.97 millones de metros cúbicos, de los cuales en la actualidad se están extrayendo 99.24 millones de metros cúbicos anuales. La recarga resultó de 72.66 millones de metros cúbicos de agua, la cual se obtiene de sumar 10.08 millones por infiltración, más 20.05 millones de retorno por riego y 42.53 por entradas horizontales. Entre la sierra Santa Úrsula y la sierra de San Francisquito se calcula una entrada de agua salobre de 19.26 millones, más 7.32 millones del Valle de Cruz de Piedra, sumando un total de 26.58 millones de metros cúbicos.

- *Fortalecimiento de la gerencia operativa del comité técnico de aguas subterráneas (COTAS) de San José de Guaymas (Integración Hidrogeológica de los estudios realizados por ITSON (2008) e IDEAS (2009) en el acuífero San José de Guaymas, municipios varios en el estado de Sonora), noviembre de 2012. A partir de la información de este trabajo se tomó la información necesaria para generar la integración de la hidrogeoquímica del trabajo de tesis a presentar.*



4. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1 LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.

El acuífero San José de Guaymas, definido con la clave 2636 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la planicie costera del Estado de Sonora, al norte del puerto de Guaymas, entre las coordenadas geográficas 110° 47' 16.8" y 111° 11' 20.4" de longitud oeste, y 27° 55' 4.8" y 28° 19' 26.4" de latitud norte, cubriendo una superficie de 1214.27 km².

El acuífero San José de Guaymas limita al noroeste con el acuífero Sahuaral, al noreste con el acuífero Valle de Guaymas y al sur con el Golfo de California (Figura 4.1). Geopolíticamente, comprende parcialmente los municipios de Empalme y Guaymas. La poligonal simplificada que delimita al acuífero se encuentra definida por los vértices cuyas coordenadas se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Límite administrativo del acuífero San José de Guaymas.

VERTICE	LONGITUD OESTE			LATITUD NORTE			OBSERVACIONES
	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	GRADOS	MINUTOS	SEGUNDOS	
1	110	56	9.6	28	19	22.8	
2	110	47	16.8	28	1	19.2	
3	110	49	30.0	27	56	9.6	
4	110	48	21.6	27	55	4.8	Del 4 al 5 por la línea de bajamar a lo largo de la costa
5	111	11	20.4	28	1	15.6	
6	111	10	48.0	28	3	21.6	
7	111	10	51.6	28	8	2.4	
8	111	7	48.0	28	9	43.2	
9	111	8	52.8	28	12	0.0	
10	111	5	6.0	28	13	37.2	
11	111	0	7.2	28	17	6.0	
12	110	59	31.2	28	19	26.4	
1	110	56	9.6	28	19	22.8	

Orográficamente, el acuífero está rodeado por las sierras La Ventana y Santa Úrsula, al este; El Aguaje, Las Pirinolas, La Navaja y Navarro, al oeste; los cerros El Sapo y La Espuela, al norte; y el cerro del Vigía, al sur.



**Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.**



El acceso principal al acuífero y sus poblaciones los constituye la carretera Federal No. 15, en el tramo que comunica a las ciudades de Hermosillo, Guaymas y Empalme. La población se concentra principalmente en la ciudad de Guaymas, así como en el ejido San José de Guaymas y San Carlos Nuevo Guaymas.

Las elevaciones topográficas en el acuífero no exceden los 850 m.s.n.m., presentándose amplias planicies con suave pendiente hacia el mar, frente a las que destacan cerros profundamente erosionados, colinas y bajas sierras rodeadas de conos aluviales muy tendidos.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora, con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

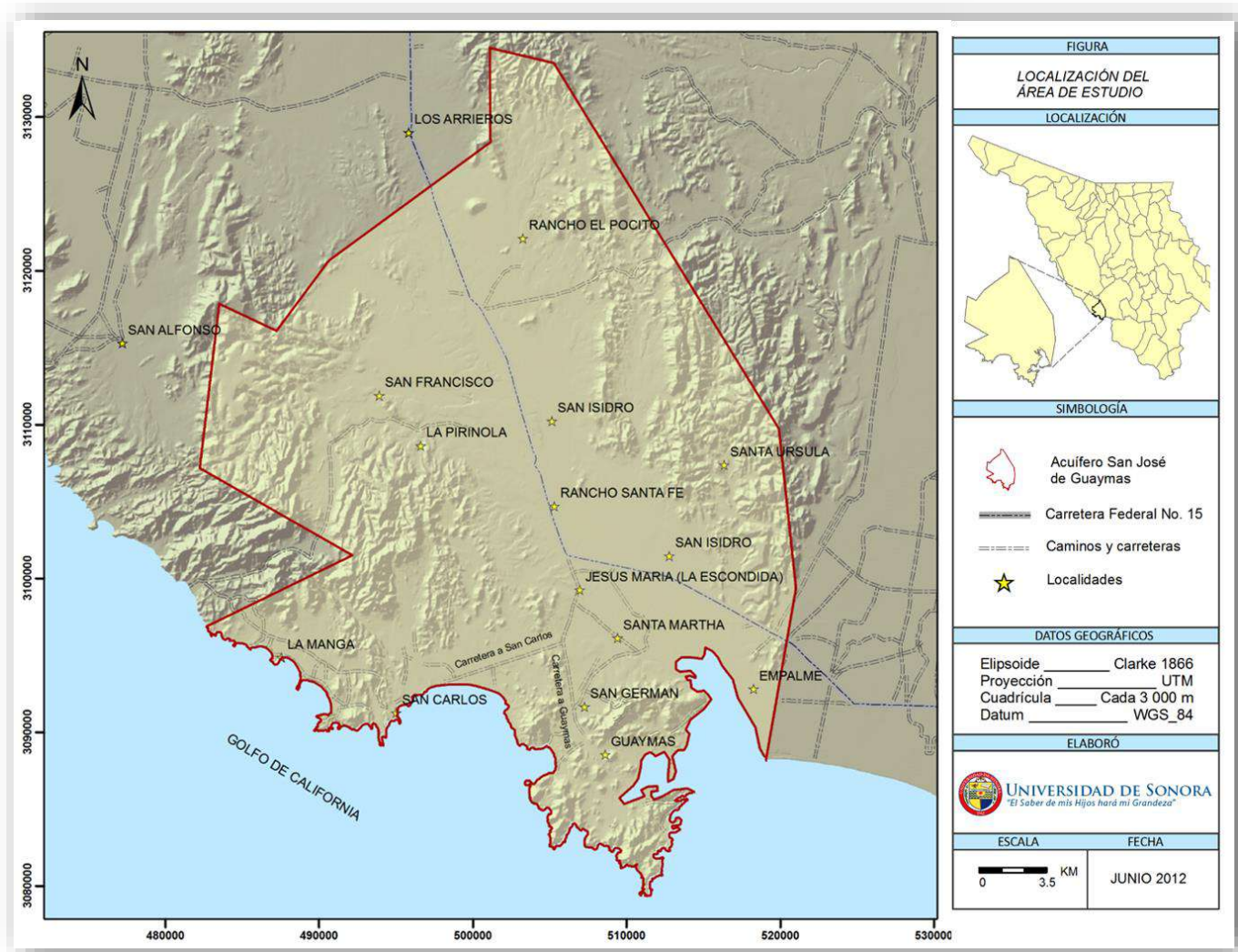


Figura 4.1. Localización del acuífero San José de Guaymas.



4.1.1 SITUACIÓN ADMINISTRATIVA DEL ACUÍFERO.

El acuífero San José de Guaymas pertenece a la Región Hidrológica-Administrativa "Noroeste". La parte este de su territorio se encuentra dentro de la zona de veda *Guaymas* cuyo decreto *establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona del Valle de Guaymas, Estado de Sonora*, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 20 de diciembre de 1956. Por otro lado, la porción oeste del acuífero se encuentra dentro de la zona de veda *Costa de Hermosillo, Tercera Ampliación*, de modo que se encuentra sujeta a las disposiciones del "*Decreto por medio del cual se amplía la zona de veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la costa de Hermosillo, Sonora*", que fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 2 de junio de 1967.

De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua, vigente para el año 2009, los municipios de Guaymas y Empalme, se ubican en la zona de disponibilidad 4. El usuario principal del agua es el sector agrícola, que conforman el Distrito de Riego 084, contiguo con el acuífero del Valle de Guaymas, el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del acuífero de San José de Guaymas (COTAS) fue constituido el 25 de abril del 2008.

El volumen de disponibilidad publicado en el año 2002 para el acuífero San José de Guaymas era de $-14.72 \text{ Mm}^3/\text{año}$. Esta publicación fue realizada tomando como respaldo un estudio realizado en 1975 y con información escasa, por lo que es necesario realizar un estudio de actualización para evaluar con precisión el volumen disponible.

Recientemente fue publicada la nueva disponibilidad de aguas subterráneas para el acuífero en el Diario Oficial de la Federación con fecha del 28 de octubre de 2009, con un volumen de -14.15 Mm^3 anuales. Sin embargo, el estudio de respaldo es el mismo que se utilizó para la publicación del 2002, dado que solamente se modificó el volumen concesionado de agua subterránea.



4.2 FISIOGRAFÍA

Según la Carta Fisiográfica escala 1:1, 000,000 emitida por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, el territorio del Estado de Sonora es dividido en cuatro provincias o regiones fisiográficas: Desierto o Llanura Sonorense, hacia el noroeste y oeste; Sierra Madre Occidental, en la parte oriental; Sierras y Llanuras del Norte, en la porción boreal, y Llanura Costera del Pacífico, en el sur.

El acuífero San José de Guaymas se encuentra dentro de la provincia Desierto o Llanura Sonorense, la cual se extiende de sur a norte en el estado de Sonora, abarcando gran parte de las regiones costeras. Está dividida en dos subprovincias y una discontinuidad: Sierras y Llanuras Sonorenses, Desierto de Altar y Sierra del Pinacate (respectivamente), esta última ubicada al norte-noroeste de la Provincia. Dentro de los límites administrativos del acuífero, las principales formas fisiográficas que se presentan son cuatro (Figura 4.2):

- *Gran Bajada con Lomerío*: constituye las principales planicies, incluyendo el valle de San José de Guaymas. Se manifiesta en el centro del acuífero y se compone principalmente de sedimentos recientes.
- *Sierra Escarpada Compleja*: ocurre hacia los márgenes del acuífero, donde se encuentran las sierras que constituyen los principales parteaguas. Están formadas principalmente por rocas volcánicas.
- *Mesa Basáltica con Sierras*: ocurre solamente al noroeste del acuífero y su principal característica es estar conformadas por unidades basálticas del Mioceno que generan amplias mesetas.
- *Lomerío Complejo*: su distribución es escasa, ocurriendo solamente al norte del acuífero. Por lo general se componen de rocas antiguas con grados de erosión mayor a causa de fracturamiento y alteración.

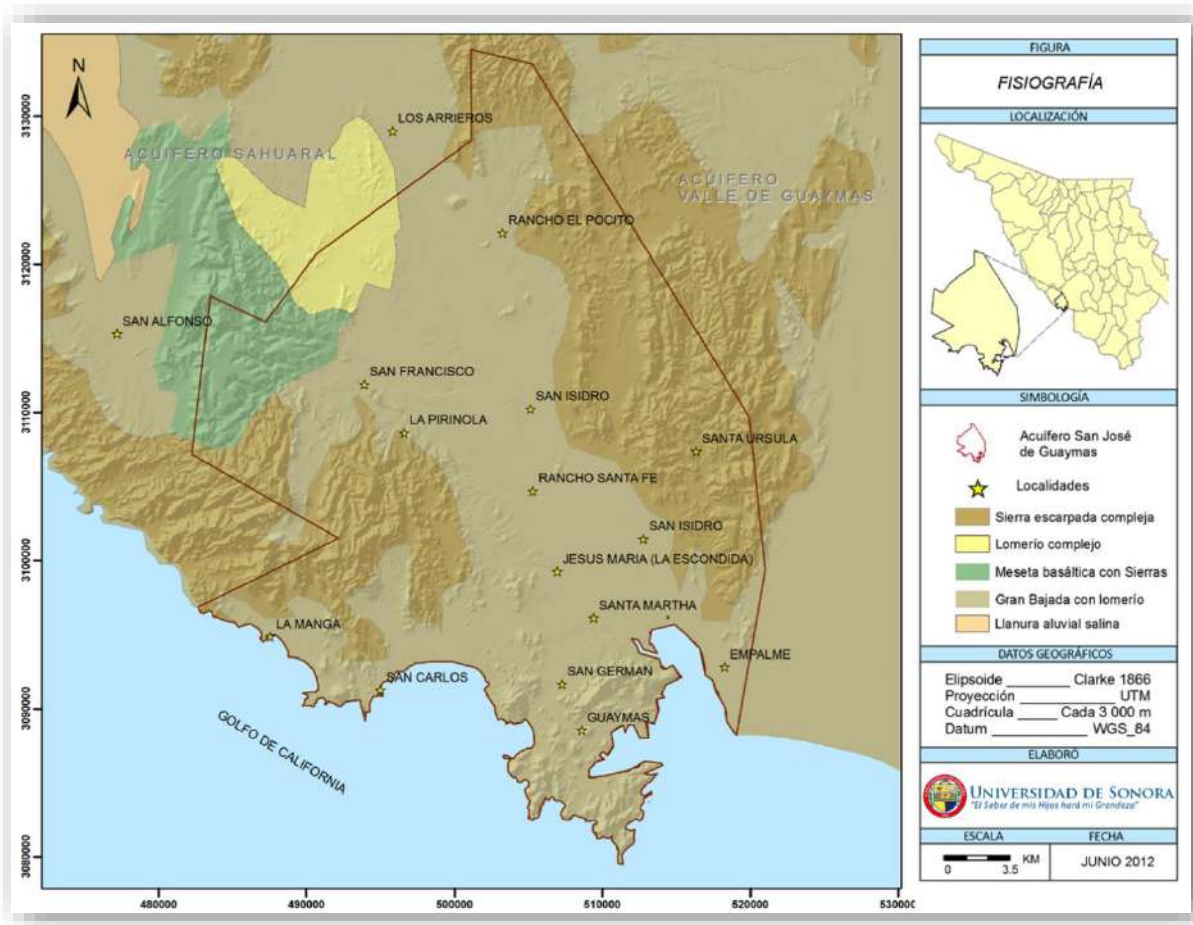


Figura 4.2. Fisiografía del acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).

4.3 CLIMATOLOGÍA

4.3.1 Tipo de clima

El clima que domina en el área es de tipo BW (h') hw, según la clasificación climática de Köppen modificada por Enriqueta García (1981), corresponde a un clima muy seco, con régimen de lluvias en verano y porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2. Es cálido, con temperatura media anual de 22°C. En algunas sierras de los alrededores del acuífero se manifiesta un clima de tipo BWhw, que presenta las mismas características que el anterior, a diferencia que este es de tipo semicálido con invierno fresco (Figura 4.3).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



El acuífero San José de Guaymas solo cuenta con dos estaciones climatológicas con influencia en la zona, ambas operadas por la Comisión Nacional del Agua. En la tabla 4.2 se presenta la ubicación de cada una de ellas, así como el período con datos. Aunque la información se encuentra actualizada hasta el año 2009, con el fin de ser consistentes en el análisis de los parámetros climatológicos, se tomará hasta el año 2008 completo.

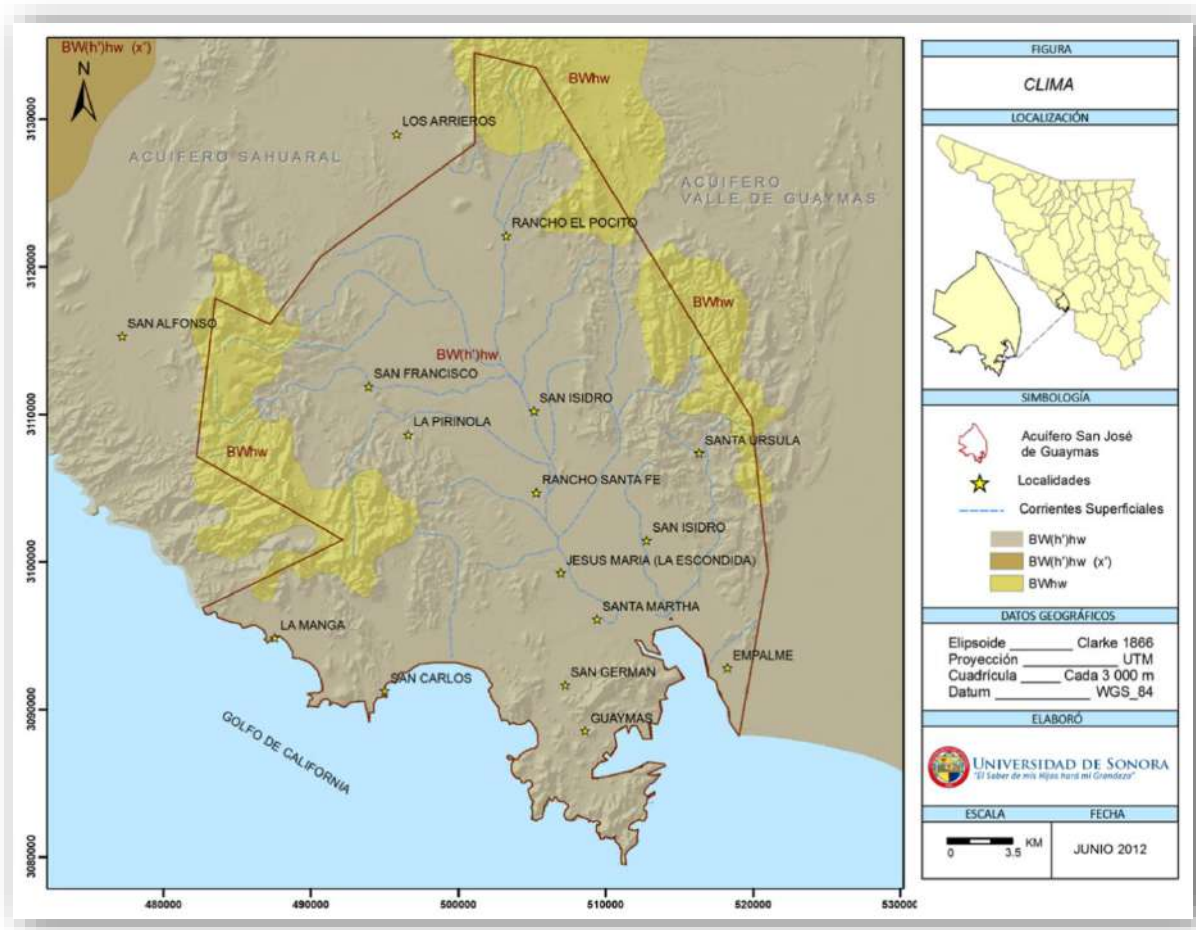


Figura 4.3. Tipos de clima en el acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).



Tabla 4.2. Estaciones climatológicas en la cuenca Río Mátape.

ESTACIÓN	MUNICIPIO	COORDENADAS UTM		PERIODO CON DATOS	
		X	Y	DE	A
Empalme Observatorio	Empalme	523262.2	3092750.0	1980	2009
Francisco Márquez	Empalme	538130.0	3113707.0	2001	2009

En el caso de la estación Empalme Observatorio, se cuenta con información completa en el período de 1980 a 2009 para precipitaciones y temperaturas, excepto para evaporación potencial, ya que estos datos no se encuentran disponibles en el Organismo de Cuenca Noroeste de la CONAGUA.

Para la estación Francisco Márquez los datos existentes del período 2001-2008 se encuentran incompletos. En lo que respecta a precipitación, no existen datos en 8 meses de los años 2001 y 2002, y para temperaturas los datos están disponibles hasta el año 2007. En todo el período existe información solo en 34 de los 48 meses.

Es por ello que para el análisis de los parámetros climatológicos en el acuífero sólo se considera la información generada en la estación Empalme Observatorio y la de estación Francisco Márquez solo se usa como referencia para el análisis de la evaporación.

4.3.2 Precipitación

En la región donde se ubica el acuífero San José de Guaymas el régimen pluvial presenta dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos de lluvia, y el otro de precipitaciones invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas provocadas por los frentes fríos que afectan la región.

En la figura 4.4 se presenta la distribución mensual de la lluvia en la estación Empalme Observatorio, para el período de 1980 a 2008. La precipitación media anual es de 280.9 mm, con la mayor lámina de lluvia en los meses de julio, agosto y septiembre, en los que se alcanzan 45.9 mm, 73.8 mm y 64.3 mm, respectivamente, lo que representa un 65.5% de la precipitación total anual. En la temporada invernal, las precipitaciones alcanzan valores de 24.1 mm en el mes de diciembre. El periodo de estiaje se registra en



los meses de abril, mayo y junio con valores de precipitación de 1.4 mm, 0.3 mm y 3.1 mm respectivamente, lo que representa solo el 1.7% de la lluvia media anual.

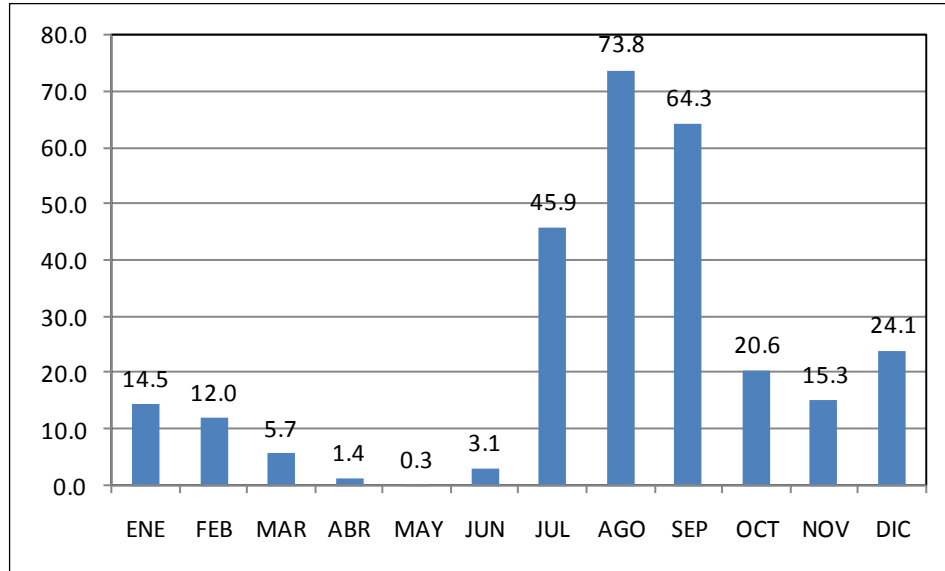


Figura 4.4. Precipitación media anual, estación Empalme Observatorio (CEA, 2012).

4.3.3 Precipitación histórica

En el mes de septiembre de 2009 se presentó un evento extremo ocasionado por el paso del huracán "Jimena", que tuvo una trayectoria muy cercana a las costas de México. Desde su inicio originó una importante entrada de humedad y desarrollo de inestabilidad con tormentas intensas hacia los estados costeros del Pacífico e incluso a los del Centro y Norte del país, para posteriormente continuar con el aporte de humedad hacia la mayor parte del Territorio Nacional. El paso del huracán por el estado de Sonora fue los días 3 y 4 de septiembre, registrando una cifra record de lluvia en la estación Empalme, debido al efecto de la convección generada por tres núcleos provenientes de las bandas periféricas del cuadrante Noreste de "Jimena". Las isoyetas definidas para este evento en la zona de estudio, se muestran en la figura 4.5.

Las lluvias máximas puntuales en 24 horas reportadas durante el periodo de "Jimena" en la ciudad de Guaymas, Sonora fueron: del 2 al 3 de septiembre de 157.0 mm y del 3 al 4 de septiembre 514.9 mm. En la figura 4.6 se muestra la evolución de la



precipitación cada media hora, donde se aprecia que la mayor intensidad de precipitación se presentó el día 3 de septiembre entre las 9:00 y las 18:00 horas.

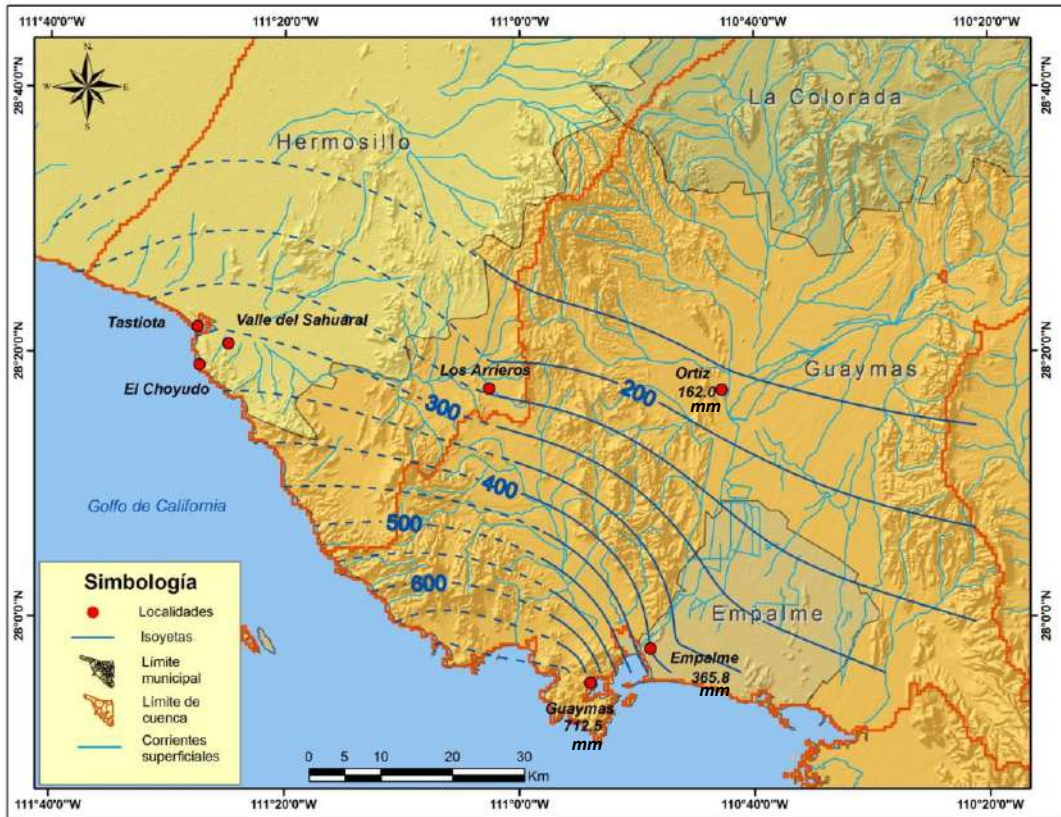


Figura 4.5. Isoyetas en la cuenca baja del Río Mátape del 2 al 4 de septiembre de 2009 (Fuente: CONAGUA).

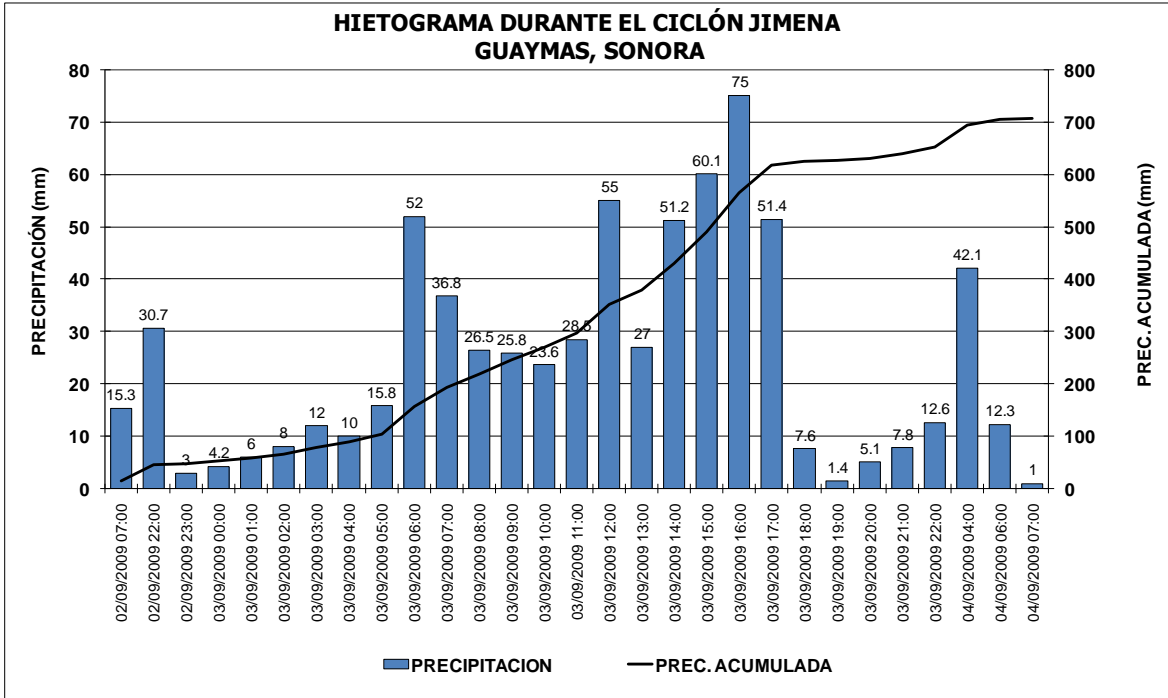


Figura 4.6. Hietograma Ciclón Jimena, Observatorio Empalme (Fuente: CONAGUA).

La tabla 4.3 muestra un comparativo de las precipitaciones acumuladas en 24 horas por el efecto de diferentes huracanes en varias localidades. Se observa que la cifra de 514.9 mm reportada en la estación Empalme superó el record histórico por los efectos directos de un huracán en tierra firme sobre México. El anterior récord correspondía a "Gilbert" el 16 de septiembre de 1988 con 485 mm en Santa Catarina, Nuevo León. El récord de precipitación en territorio insular le pertenece al huracán "Wilma", con 1,560 mm/24 h reportado por la Estación Automática operada por la Secretaría de Marina entre el 21 y 22 de octubre de 2005 (Isla Mujeres, Quintana Roo).



**Tabla 4.3. Record histórico de precipitación por efecto de huracanes en México
(Fuente: CONAGUA).**

	Cantidad en mm/24 h	Lugar	Huracán	fecha	Año
En territorio insular	1576	Is. Mujeres, QR	Wilma	21-22 Oct	2005
En tierra firme	Cantidad en mm/24 h	Lugar	Huracán	fecha	Año
1	515	Guaymas, Son.	Jimena	3-4 Sep	2009
2	485	Sta. Catarina, NL	Gilbert	16-17 Sep	1988
3	449	San Bartolo, BCS	John	1-2 Sep	2006
4	427	Tanzabaca, SLP	Gert	20-21 Sep	1993
5	425	San Bartolo, BCS	Liza	29-30 Sep	1976
6	422	P. La Villita, Mich	Hernan	4-5 Oct	1996
7	420	Tenango, Pue.	DT 11 / FF	4-5 Oct	1999
8	411	Acapulco, Gro.	Pauline	8-9 Oct	1997

4.3.4 Temperatura

Considerando la información de la estación Empalme Observatorio, la temperatura media anual en el acuífero es de 25.2 °C. La temperatura media anual máxima se registra en los meses de julio y agosto, con 31.3 °C y 31.2 °C, respectivamente, mientras que las temperaturas medias mínimas anuales se presentan en los meses de diciembre y enero, con 17.7 °C y 17.5 °C, respectivamente. En la figura 4.7 se presenta la distribución mensual de la temperatura media, del periodo de 1980 a 2009.

En cuanto a temperaturas extremas, la estación ha reportado una máxima de 46.9°C en el mes de junio de 1980 y una mínima de -1.5°C en enero de 1987.

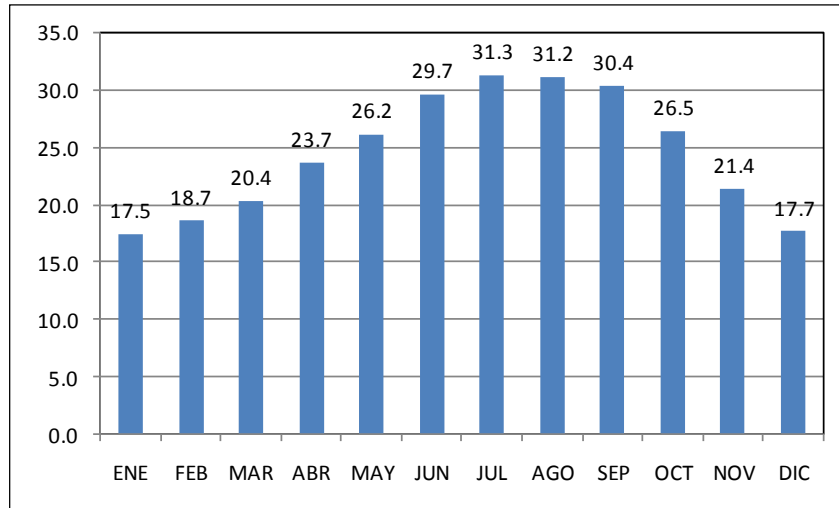


Figura 4.7. Temperatura media en la estación Empalme Observatorio, en la región de San José de Guaymas 1980 – 2009 (CEA, 2012).

4.3.5 Evaporación

No se cuenta con datos de evaporación potencial en la estación de Empalme Observatorio. Sin embargo, de acuerdo con los datos de la estación Francisco Márquez para el período de 2001 a 2007, el acuífero San José de Guaymas presenta una evaporación total promedio de 2,103.7 mm.

Es importante tomar con reserva esta información ya que solo se trata de 7 años incompletos, de los cuales solamente se tienen datos en 34 de 84 meses del período 2001-2007, lo que representa un 40.5 % de meses con datos en un registro corto de información.

4.3.6 Evapotranspiración Real

La evapotranspiración real (ETR) se determina aplicando métodos indirectos; adicionalmente, en la actualidad se utilizan las imágenes de satélite para estimar los valores reales de evapotranspiración aplicando diversos modelos computacionales.



Para estimar la evapotranspiración real media anual, se utilizaron los métodos de *Turc* y *Coutagne*; sin embargo, debido a las limitaciones de estos métodos empíricos y considerando las características climatológicas de la zona, se observa que el método de *Turc* no es aplicable a la región, ya que al utilizar la metodología propuesta por esta ecuación, la evapotranspiración real resulta superior al 100% de la precipitación. Por ello, la evapotranspiración se obtuvo a partir del método de *Coutagne*, mediante la ecuación:

$$ETR = P - XP^2$$

Donde:

ETR = Evapotranspiración real anual, en m

P = Precipitación total anual, en m

X = Parámetro de cálculo, función de la Temperatura Media Anual, en °C
 $= 1/(0.8 + 0.14t)$

t = Temperatura Media Anual, en °C

Tomando en cuenta la ecuación anterior, la lámina de evapotranspiración obtenida en el análisis es de 263.0 mm anuales.

4.4 HIDROLOGÍA

El acuífero San José de Guaymas se localiza en la Región Hidrológica 9 "Sonora Sur" y a su vez en la parte baja de la cuenca del Río Mátape, descargando hacia el Golfo de California (Figura 4.8). La región se caracteriza por sus bajas precipitaciones, lo que propicia una escasez de agua superficial y hace necesario la extracción de agua del acuífero para los diferentes usos.

La cuenca del Río Mátape tiene un área de 7450 km², ocupando el 5% de la superficie del Estado de Sonora. Presenta un clima seco y una precipitación media anual calculada de 411 mm. Esta cuenca hidrológica contiene tres acuíferos de regular importancia en el estado: Río Mátape, Valle de Guaymas y San José de Guaymas, donde el agua que se les extrae es destinada a actividades agrícolas, domésticas y pecuarias.

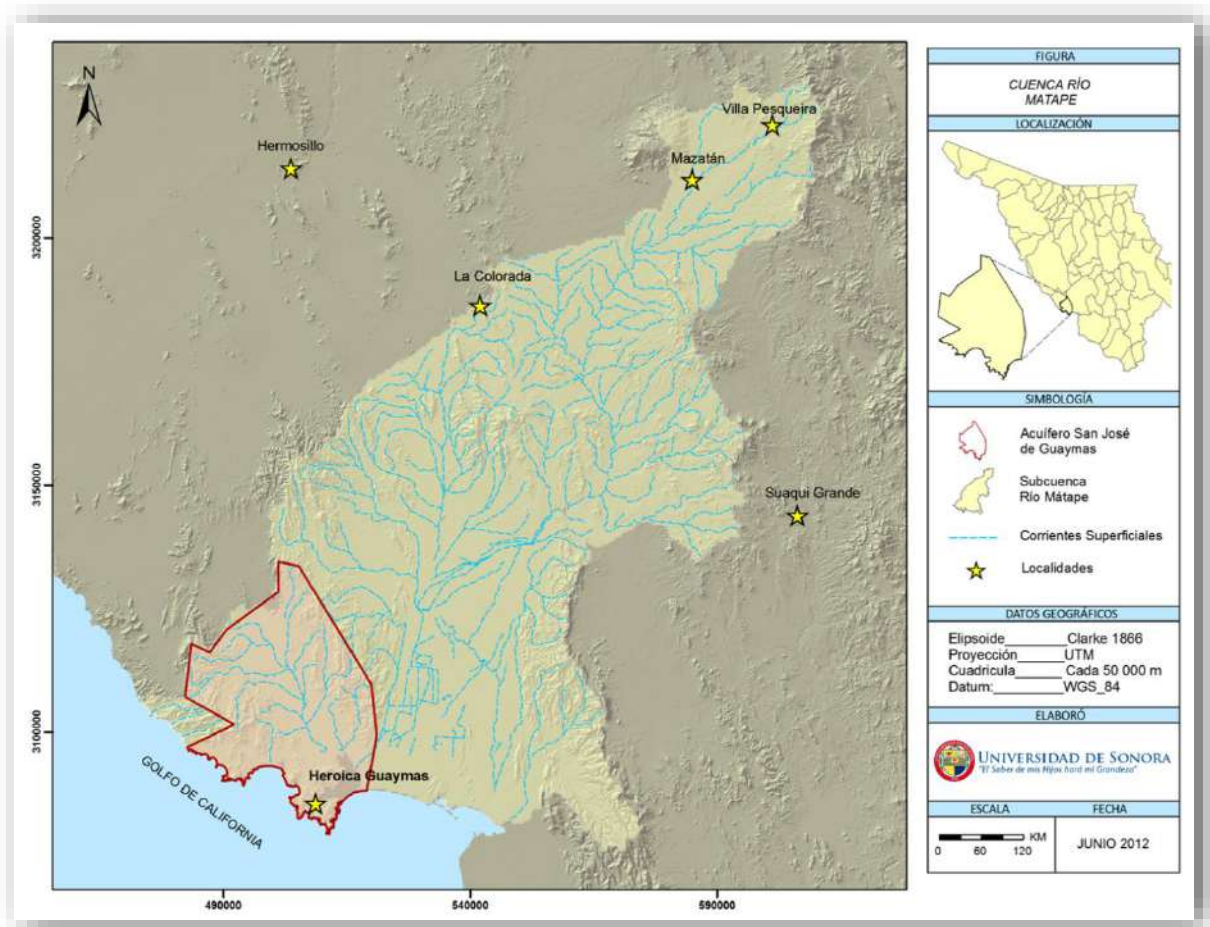


Figura 4.8. Ubicación del acuífero de San José de Guaymas dentro de la cuenca del Río Mátape (CEA, 2012).

El Río Mátape es el rasgo hidrográfico de mayor importancia para la cuenca, el cual nace cerca de la población de Mátape y lleva una dirección general hacia el sur, desembocando en el Golfo de California por el oriente del puerto de Guaymas. Es de tipo intermitente, y solo lleva agua durante períodos de lluvia, aunque es posible encontrar siempre agua en su subálveo. Sus principales tributarios son los arroyos El Echo y El Seco, que confluyen por la margen derecha cerca de la población de Ortiz, Sonora.

El cauce principal en el acuífero San José de Guaymas es el arroyo San José, el cual escurre con dirección norte-sur, y desemboca en el estero El Rancho, que forma parte del Golfo de California. Sus afluentes principales son los arroyos La Tinaja, Nochebuena, El



Tigre, La Mula, El Guajare y San Vicente que sólo llevan agua en época de lluvia (Figura 4.9).

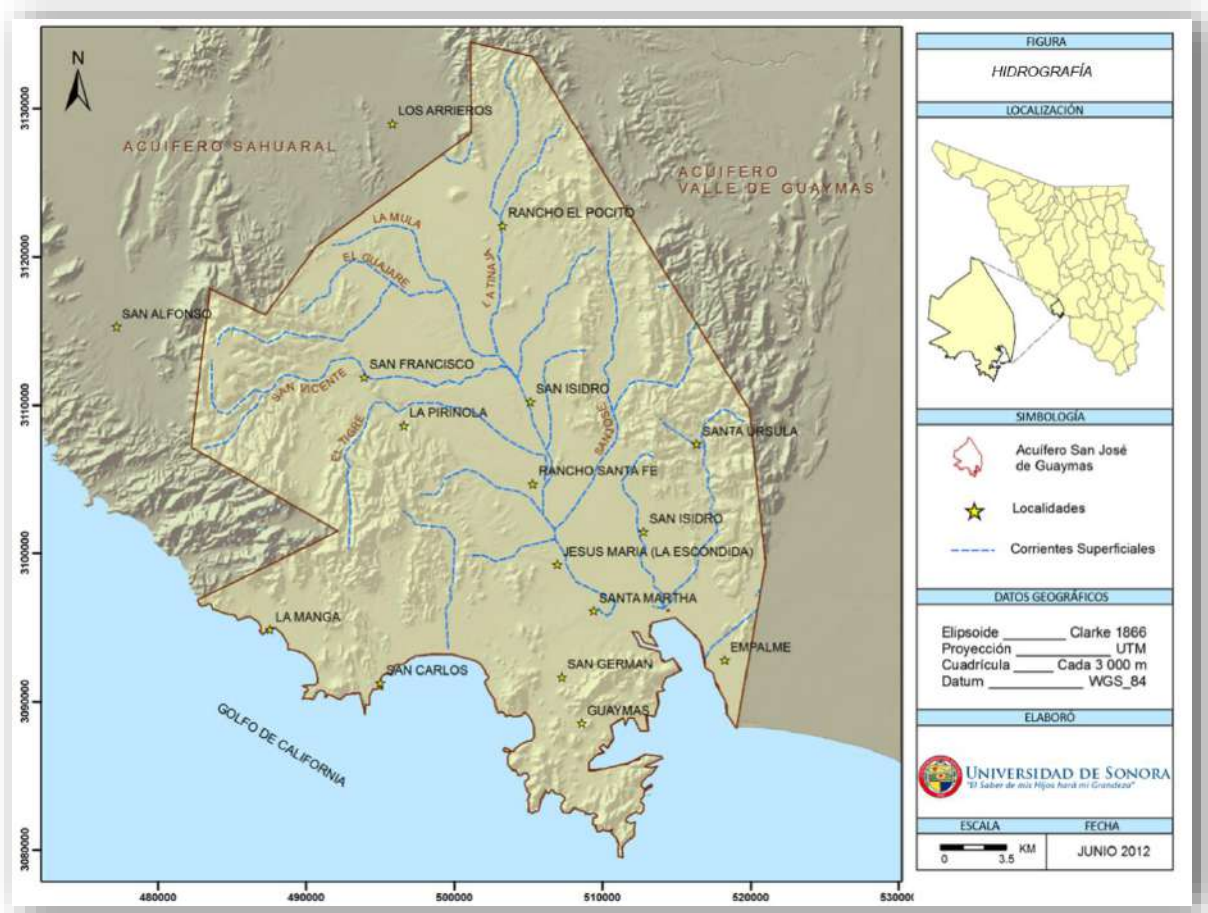


Figura 4.9. Hidrografía del acuífero de San José de Guaymas (CEA, 2012).

4.5 GEOMORFOLOGÍA

Los principales límites hidrográficos del acuífero están representados por la Sierra Santa Úrsula y por la Sierra el Aguaje. Geomorfológicamente estas dos principales formas fisiográficas son consideradas como montaña alta con piedemonte metaestable, las cuales están bordeadas por lomerío volcánico y lomerío sedimentario con piedemonte metaestable y estable. La zona del Valle de San José de Guaymas corresponde con planicie aluvial y de forma intermitente ocurren lomeríos aislados rocosos y de sedimentos que por lo general cuentan con piedemonte estable.



De acuerdo a la carta de unidades Geomorfológicas de México (Lugo, 1990), en el acuífero San José de Guaymas se presentan diferentes formas, donde predominan principalmente las planicies y las montañas altas (Figura 4.10).

- **Montaña alta.** La unidad es de pendiente inestable, formada por rocas volcánicas intermedias y volcánicas ácidas del Terciario Inferior. Esta unidad se presenta en los límites del acuífero, como en la Sierra Santa Úrsula y la Sierra el Aguaje, alcanzando las máximas elevaciones en el acuífero, que ascienden hasta 850 m.s.n.m.
- **Montaña baja.** Es de pendiente metaestable, y se presenta de dos formas: la primera constituida por rocas volcánicas intermedias y volcánicas ácidas, y la segunda por rocas volcánicas ácidas del Terciario Mioceno. Esta unidad se localiza en la porción sur del acuífero, cercano a la línea de costa. Presenta accidentes topográficos con elevaciones moderadas (entre 50 y 350 msnm).
- **Planicies.** En el acuífero se presentan de cuatro tipos, que en orden de importancia son: planicie aluvial divergente superior, planicie aluvial, planicie con actividad antrópica, y planicie costera activa. Todas están formada por gravas, arenas, limos y arcillas del Cuaternario Holoceno, y constituye la llanura del valle de San José, con elevaciones desde 0 – 200 m.s.n.m. Muestra un patrón de drenaje dendrítico y generalmente alcanza pendientes bajas a moderadas ($< 15^\circ$).
- **Lomeríos.** De acuerdo al tipo de pendiente, en el acuífero San José de Guaymas esta unidad se presenta de tres tipos: estable, inestable y metaestable. La primera es formada por conglomerado polimíctico del Cuaternario Pleistoceno y por rocas volcánicas ácidas e intermedias del Terciario Inferior. La segunda la conforman rocas volcánicas ácidas e intermedias del Terciario Mioceno, en tanto que la de pendiente metaestable se encuentra constituida por rocas plutónicas intermedias y ácidas del Cretácico Superior – Terciario Paleoceno, y rocas volcánicas ácidas e intermedias del Terciario Mioceno. Los lomeríos se presentan principalmente en la parte central del acuífero y en algunas zonas al este y noreste.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



- **Piedemonte.** Se presentan dos variedades de esta unidad en el acuífero en cuanto la pendiente que presentan, que orden de predominio son: piedemonte de pendiente metaestable, formado por roca volcánica intermedia y volcánica ácida del Terciario Mioceno; y piedemonte de pendiente metaestable, que a su vez se divide en cuatro grupos de acuerdo al su constitución: 1. roca plutónica intermedia y plutónica ácida del Terciario Mioceno, 2. roca volcánica básica del Terciario Mioceno, 3. rocas plutónicas intermedias y plutónicas ácidas del Cretácico Superior – Terciario Paleoceno, y 4. roca volcánica intermedia del Terciario Mioceno. Esta unidad se presenta rodeando a las montañas.

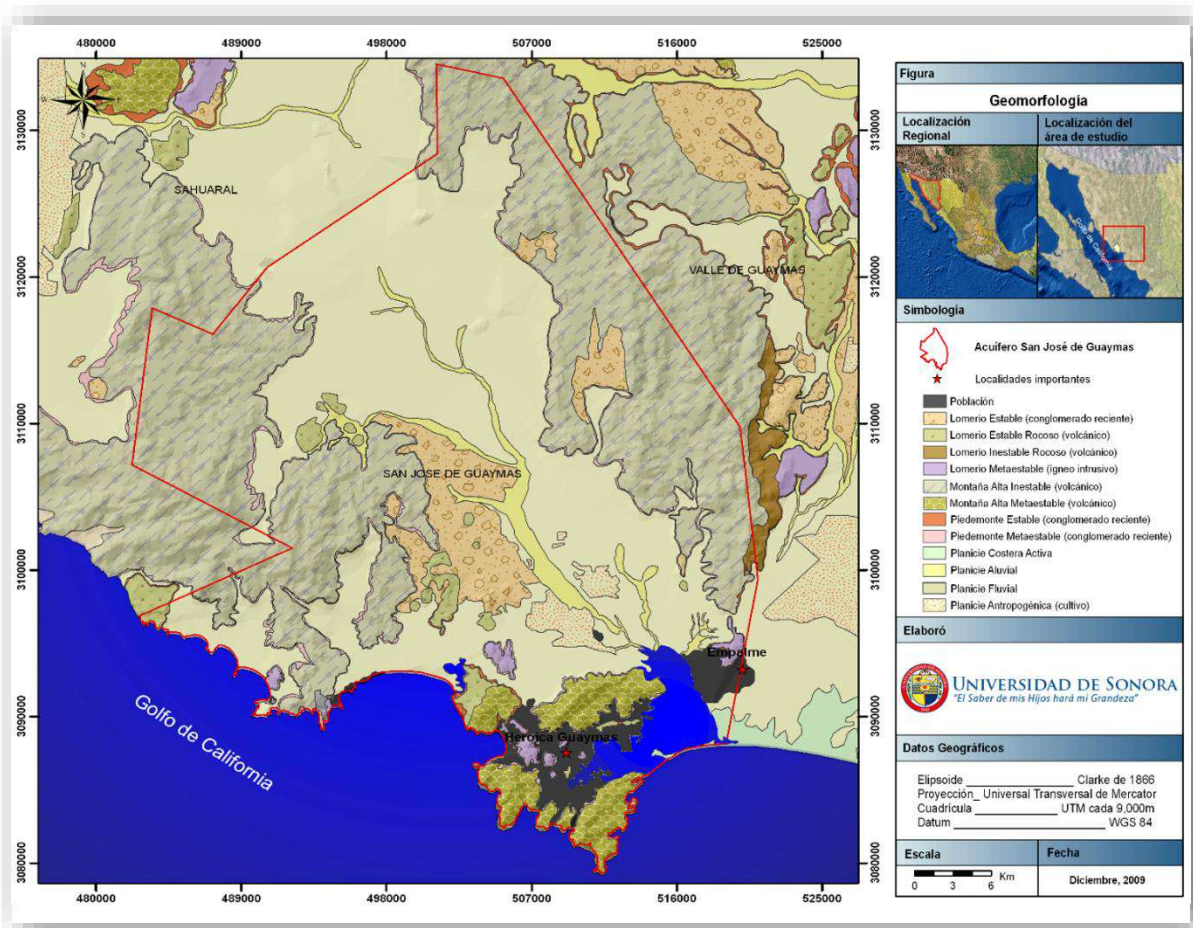


Figura 4.10. Geomorfología del acuífero San José de Guaymas (IDEAS, 2009).



4.6 GEOLOGÍA

4.6.1 Tectónica Regional

Ha sido bien documentado que durante el Cretácico Superior, aproximadamente a partir de los 90 Ma, inició un largo período de subducción de la Placa Farallón (ahora extinta) bajo la Placa Norteamérica. En este proceso la Placa Farallón, la cual consistía de una corteza oceánica que incluía fragmentos de corteza continental (posiblemente arcos de islas) que fueron intermitentemente acrecionados a la Placa Norteamérica, ocasionó la activación de un fuerte magmatismo y deformación continental mediante sistemas estructurales compresivos y generación de grandes fallas inversas de bajo ángulo (cabalgaduras) en la corteza superior.

Durante todo este episodio de subducción se dio lugar la Orogenia Laramide, evento orogénico que se extiende a lo largo de todo el margen Pacífico de Norteamérica, cuyos productos directos están representados por el emplazamiento de secuencias volcánicas calcoalcalinas depositadas simultáneamente con secuencias sedimentarias de cuencas marginales, las cuales se interrelacionan para formar grupos estratigráficos de grandes espesores, representadas en Sonora principalmente por las formaciones volcanosedimentarias del Cretácico Superior.

Este evento trajo consigo una extensiva producción de cuerpos plutónicos cuyas relaciones litológicas y cronológicas muestran que fueron generados por diferentes eventos magmáticos de distinta intensidad distribuidos en tiempo a lo largo de todo el período de subducción (90-30 Ma). Aunque el vector de subducción ha sido determinado con dirección ENE-NE, actualmente el sistema estructural que le representa es ligeramente oblicuo (N-NNE).

Este evento está muy poco registrado dentro del área del acuífero de San José de Guaymas, ya que solamente ocurren escasos afloramientos de cuerpos plutónicos de composición granítica típicos de este evento y algunos afloramientos de limitada ocurrencia de secuencias volcano-sedimentarias del Cretácico Superior.

Hacia el final de este período de subducción, durante el Eoceno-Oligoceno, se emplazan enormes cantidades de riolitas e ignimbritas que edifican la Sierra Madre



Occidental (SMO), magmatismo que ha sido generalmente asociado al cese de la subducción. Es posible que la mayoría de los yacimientos magmático-hidrotermales del Estado de Sonora, estén asociados al magmatismo Paleoceno-Eoceno asociado a este volcanismo. Aunque es un evento tectonomagmático de gran repercusión en la evolución tectónica del NW de México, sus límites geográficos le restringen a la Provincia Fisiográfica de la Sierra Madre Occidental (SMO), y solamente algunos pequeños afloramientos dispersos se localizan dentro de los límites del acuífero.

Una vez concluido el proceso de subducción, inicia un relajamiento cortical asociado a la pérdida de energía acumulada durante la subducción que dio origen a la provincia extensional del *Basin and Range* durante el Mioceno, aproximadamente entre los 25 y los 12 Ma.

Este evento es un episodio tectónico regional muy importante que ocurre en gran parte del oeste de Estados Unidos y Noroeste de México, puesto que representa una etapa de adelgazamiento cortical que contrarresta el efecto compresivo de la subducción y extiende la litósfera generando un sistema estructural que desarrolla patrones geométricos dispuestos en bloques (horst-graben) con direcciones de fallamiento semiperpendicular al vector de subducción (NNW-SSE).

Así, los bajos estructurales (graben) son cuencas alargadas NW-SE cuya principal característica es que son rellenadas por molasas continentales sintectónicas que son el producto de la erosión de los altos estructurales (horst). Esta unidad sedimentaria típicamente está representada por conglomerados polimícticos (ocasionalmente oligomícticos) generalmente consolidados y cementados con material autigénico carbonatado y zeolitas que son el producto de la degradación directa de los epiclastos vítreos del volcanismo riolítico de la SMO.

Las zonas de máxima extensión cortical de este episodio tectónico, ocurren hacia el W-NW del Estado, y particularmente dentro del área de estudio es evidente que el grado de segmentación de afloramientos de unidades anteriores al Mioceno y desarrollo de amplios valles puede asociarse a este fenómeno.



Hacia el final del *Basin and Range*, en el Plioceno, ocurre otro cambio en el régimen tectónico regional, e inicia una ruptura continental asociada a la apertura del Golfo de California (~ 8 Ma), el cual actualmente se encuentra activo y ha sido un claro ejemplo de rifting continental mundialmente documentado desde el surgimiento de la teoría de la tectónica de placas. Este proceso de rompimiento genera un área de afectación estructural que es conocida como Provincia Extensional del Golfo que se asocia a un volcanismo intermedio a ácido de gran extensión en Sonora y Baja California.

El Cuaternario se encuentra representado por un régimen tectónico activo en el que la oceanización marcada por la apertura del Golfo de California ocasiona que la región sea sísmicamente activa. Por otro lado, la sedimentación de unidades detríticas-continuales asociadas a las grandes llanuras de la provincia de Sierras y Llanuras Sonorenses domina en el ambiente continental. Las amplias planicies costeras y su interrelación con los ambientes sedimentarios marinos producen una serie de unidades que son de ocurrencia limitada a las regiones costeras, produciendo una gran cantidad de unidades sedimentarias de origen mixto.

Los dos eventos tectónicos que producen una mayor influencia en la distribución de afloramientos y en los rasgos geomorfológicos son la extensión del *Basin and Range* y la apertura del Golfo de California. La influencia de ambos sistemas es primordialmente estructural, y las principales tendencias están dadas por fallas orientadas NE-SW y en menor proporción N-S mostradas en la figura 4.11.

4.6.2 Estratigrafía

La estratigrafía de las unidades litológicas que ocurren dentro del acuífero de San José de Guaymas, poseen un rango de edades que van desde el Paleozoico hasta el Reciente. Estas unidades corresponden con rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias que poseen diferentes grados de afectación estructural, según los eventos tectónicos a los cuales estuvieron expuestas. Aunque las unidades sedimentarias recientes cubren la mayor área del acuífero, las rocas ígneas volcánicas e intrusivas representan una importante porción de los afloramientos rocosos del acuífero (Figura 4.12), y posiblemente tengan gran influencia en la hidrodinámica subterránea.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



Las unidades descritas tienen como principal referencia la cartografía puesta a disposición por parte del Servicio Geológico Mexicano (SGM) en sus cartas escala 1:250,000, Guaymas (G12-2) y Sierra Libre (H12-11).

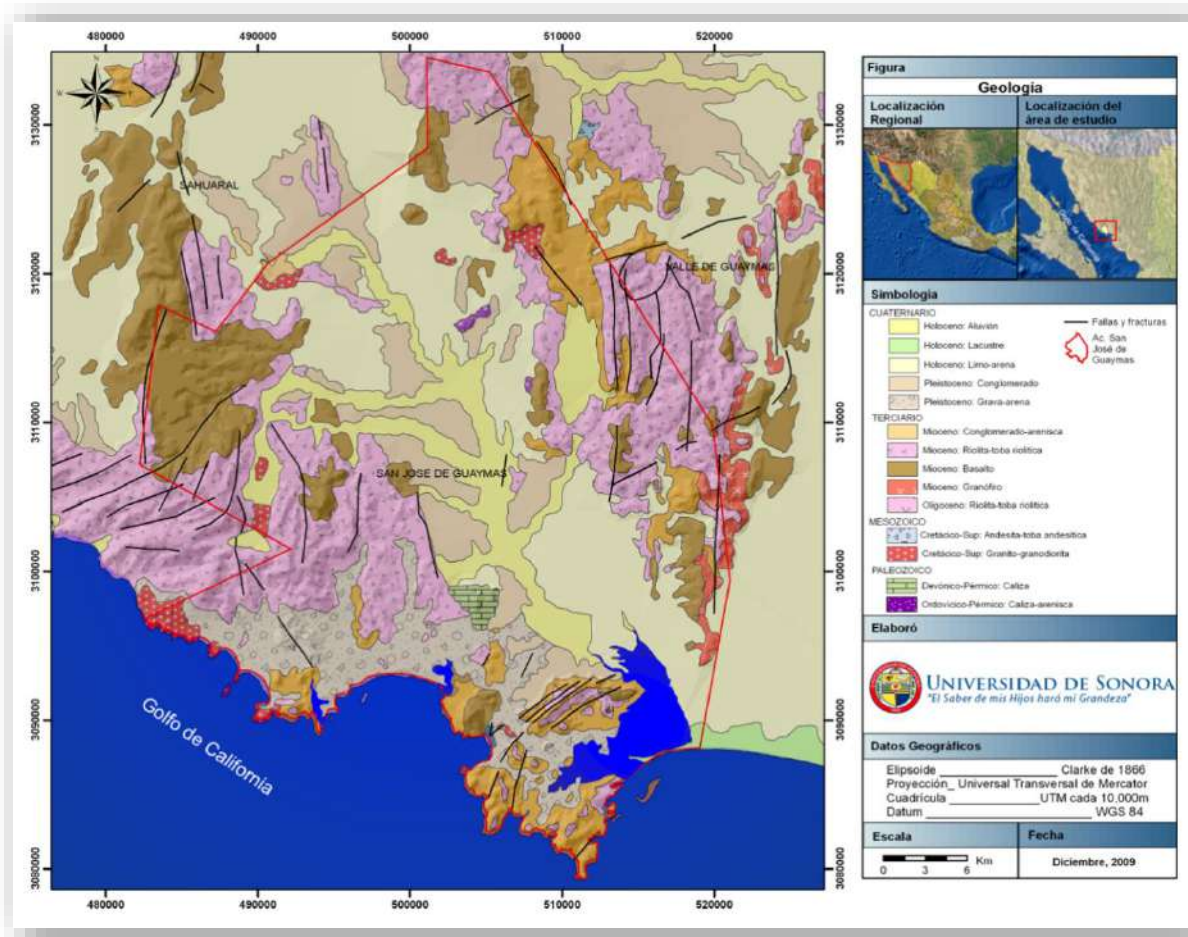


Figura 4.11. Geología del Acuífero administrativo de San José de Guaymas (IDEAS, 2009).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

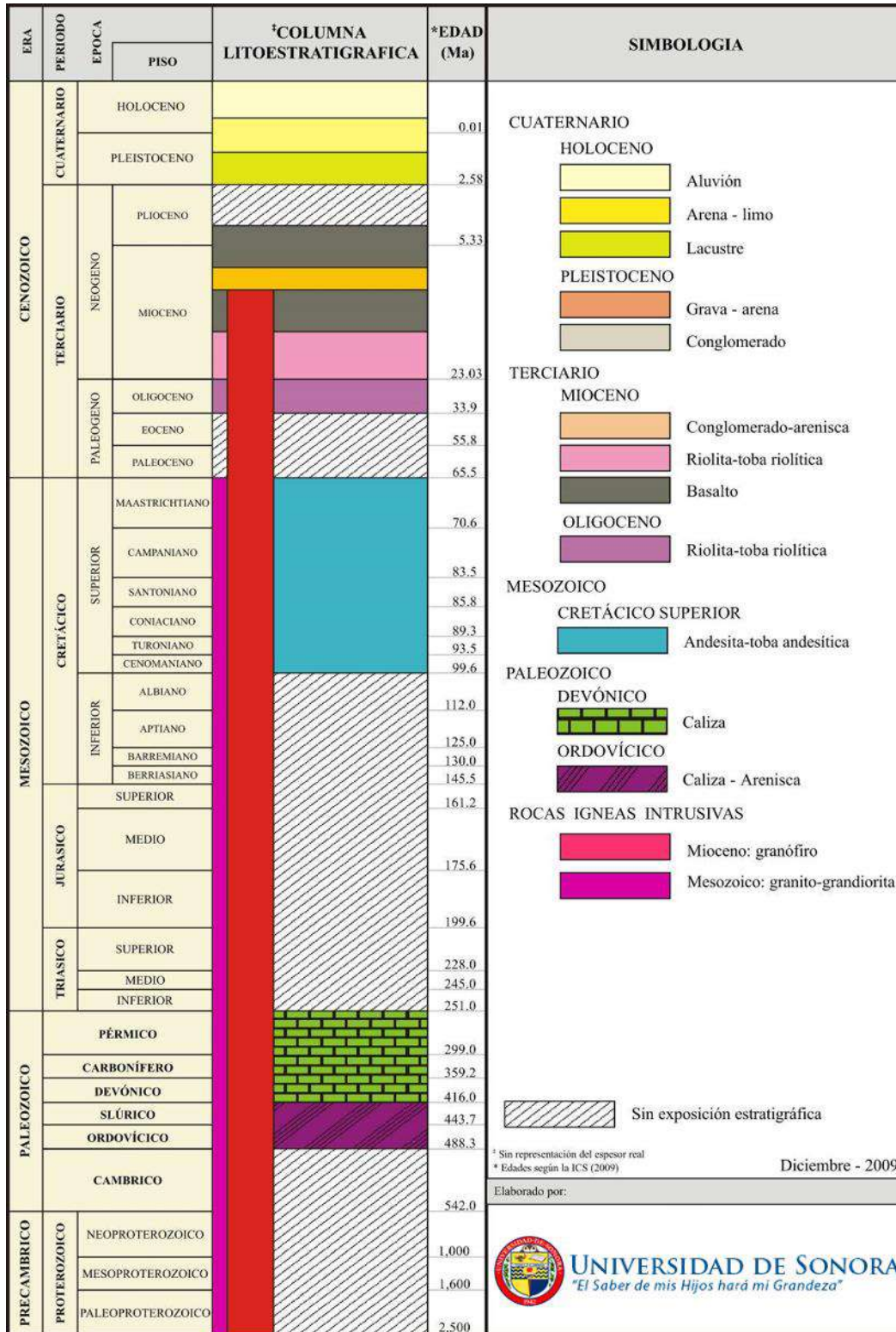


Figura 4.12. Columna estratigráfica del acuífero (IDEAS, 2009).



Aunque dentro del límite administrativo del acuífero, no ocurren afloramientos importantes de unidades anteriores al Mesozoico, a nivel regional es notoria la presencia de secuencias carbonatadas del Paleozoico, de tal forma que es posible que en el subsuelo ocurran con mayor distribución, ya sea desplazadas mediante estructuras o cubiertas por unidades volcánicas del Terciario. En la figura 4.12 se muestra la columna estratigráfica del acuífero, ésta resume las unidades presentes y su orden cronoestratigráfico.

Paleozoico

Esta unidad representa la litología más antigua de la región. Se caracteriza por rocas sedimentarias principalmente carbonatadas con edades que van del Ordovícico al Pérmico y afloran aproximadamente a 20 km al noroeste de los límites administrativos del acuífero, y afloramientos con áreas de afloramiento muy reducidas en la parte central y norte del acuífero. Estas rocas se componen por intercalaciones de calizas de estratificación media a gruesa y areniscas inmaduras mal clasificadas. Otros afloramientos de rocas similares fueron estudiados por Valentine (1936; fuera de este acuífero) donde encontró fragmentos fósiles del Paleozoico Superior, sin embargo, se le atribuye una edad dominante del Ordovícico.

El intervalo Devónico-Pérmico consiste de secuencias estratificadas depositadas en un ambiente marino muy somero y de plataforma continental, las cuales están constituidas de caliza, arenisca, caliza arcillosa, conglomerado, lodolita y dolomía. Esta secuencia se presenta en capas de espesor delgado a mediano y contienen abundante fauna de estromatopóridos (*Amphiporasp.* y *Actinostromasp.*), briozoarios, corales y braquiópodos silicificados del Devónico Superior. El ambiente de depósito determinado por esta fauna fósil, permite definir que es de plataforma somera y plataforma arrecifal.

Mesozoico

Las unidades litoestratigráficas más representativas del Mesozoico que afloran dentro del acuífero San José de Guaymas, corresponden con rocas ígneas intrusivas y a rocas volcánicas ácidas-intermedias en una menor proporción.



Las rocas graníticas son las de mayor antigüedad. Su composición varía de granito a granodiorita y por lo general están representados por masas de baja elevación y morfologías poco abruptas, fácilmente reconocibles. Estas unidades se encuentran intrusionando a las rocas del Paleozoico y están cubiertas por las unidades volcánicas del Terciario. El rasgo estructural principal es la segmentación que divide los afloramientos en afloramientos alargados y orientados noroeste-sureste, producto de la tectónica terciaria.

Estas rocas fueron formadas debido a un magmatismo continental que permitió la generación de magmas de composición granítica y que fueron emplazados a profundidad en la corteza, sin embargo, su actual exposición en superficie también obedece a la tectónica del Cretácico y del Terciario.

Semi-contemporáneas a las rocas intrusivas, fueron emplazadas rocas volcánicas del Cretácico Superior. Estas rocas son andesitas y dacitas que poseen diferentes grados de alteración propiolítica y además de que poseen un grado de fracturamiento que varía de intenso a moderado. Están presentes en zonas muy localizadas al Norte-Noreste de los límites del acuífero, sin embargo, es posible que a profundidad representen masas de mayor importancia (Figura 4.12).

Terciario

Las unidades volcánicas emplazadas durante el Mioceno representan las unidades de mayor distribución espacial y construyen la mayoría del contexto geológico regional. Por esta razón, representan los afloramientos rocosos más abundantes dentro del acuífero. Existen también algunas unidades sedimentarias conglomeráticas antiguas que se asocian con el emplazamiento de esta secuencia volcánica, por lo que su distinción es relevante en el contexto geológico.

Existen, sin embargo, rocas de distintas edades que representan distintos ambientes de formación. Las rocas más antiguas son del Oligoceno y se asocian las últimas etapas de la subducción. Generalmente se relacionan con la formación de la Sierra Madre Occidental, ya que estas unidades se componen de riolitas y tobas riolíticas, y en menor proporción andesitas. Poseen variables grados de alteración propiolítica y por lo general se encuentran muy fracturadas.



Dentro del área también ocurre una secuencia que se compone mayormente de riolitas y tobas riolíticas, pero esta secuencia es del Terciario Medio (Mioceno) y además posee abundantes proporciones de dacitas y basaltos. La Sierra Santa Úrsula representa el mejor sitio de referencia de esta secuencia, sin embargo, las unidades basálticas se encuentran en los márgenes de estas unidades o en la cima de la secuencia, representando un evento final o terminal de este volcanismo del Mioceno.

En todo el flanco Este de la Sierra Santa Úrsula aflora un cuerpo intrusivo que corta la secuencia volcánica del Mioceno que edifica a esta sierra. La principal característica es que su textura y asociación mineral indican que se trata de cuerpos intrusivos someros subvolcánicos que muestran que el grado de exhumación de la zona ha sido importante, incluso de hasta 2 kilómetros. Estos cuerpos intrusivos someros se clasifican como granófiros y son importantes trazadores de condiciones volcánicas.

Existen, sin embargo, otras unidades basálticas más recientes (de aproximadamente 8 Ma). Estas Unidades ocurren mayormente en el Valle de Guaymas, sin embargo, no se descarta su presencia dentro del acuífero. Estas unidades se distinguen muy fácilmente por que desarrollan elementos geomorfológicos típicos (mesetas ligeramente basculadas al oeste-noroeste) y por su coloración en tonos oscuros. Estas rocas son basaltos y brechas basálticas posteriores a las unidades volcánicas dacíticas-riolíticas, a las cuales cubren en discordancia. En algunas zonas dentro de los límites del acuífero es claro que estos basaltos tienen un modo de emplazamiento controlado por estructuras como puede ser visto al sureste del cerro La Panocha y en el Graben de Empalme, fuera de los límites del acuífero.

La unidad sedimentaria antigua es por lo general asociada a los procesos tectónicos de extensión que afectan a los afloramientos rocosos pre-Mioceno, las cuales son erosionadas según la tasa de subsidencia (formación de cuencas) estructural regional, la cual puede variar de lugar a lugar, dando límites de ocurrencia de esta unidad. Corresponde con conglomerados y areniscas con grados de consolidación que varían de moderados a fuertes y que además poseen una mala clasificación granulométrica. El ambiente de sedimentación es continental y los materiales provienen de la erosión directa de las unidades volcánicas y de las unidades pre-Terciarias de la región. Por lo general se



puede correlacionar cronoestratigráficamente con la Formación Báucarit, la cual es de amplia ocurrencia.

Cuaternario

Las unidades consideradas del Cuaternario han sido catalogadas en diversos tipos según el ambiente genético sedimentario en el que fueron depositadas. Así, cada unidad posee una distribución espacial que es atribuida a su ambiente de depósito de tal forma que pueden llegar a corresponder con unidades geomorfológicas o relacionadas a su ubicación geográfica.

Las unidades conglomeráticas mal consolidadas, por lo general se desarrollan en los piedemonte de manera regular por lo que se pueden considerar como abanicos aluviales, con lo cual su característica más notoria es que se componen de conglomerados-brecha granulométricamente mal clasificados y compuestos en su mayoría por clastos angulosos cuya composición varía según la zona de la cual derivan. Por lo general se forman por procesos de intemperismo mecánico ocasionado por las temperaturas extremas y el viento.

En la porción sur del acuífero, los piedemonte que pertenecen a los acantilados y en las sierras próximas a los márgenes costeros son de gran amplitud y espesor. Estos sedimentos por lo general corresponden con sedimentos gruesos compuestos por grava y arena no consolidada, evidencia de ello es que son comúnmente utilizados como banco de materiales para la construcción. Aunque el espesor de estos materiales puede ser de algunas decenas de metros, es posible que solo cuente con algunos metros de espesor en las cercanías a los piedemonte.

Realizando un recorrido transversal al acuífero y siguiendo los cauces principales, los sedimentos identificados corresponden con arcilla, limo y arena, que representa al material aluvial. El espesor de este material aluvial puede alcanzar desde algunas decenas de metros, sin embargo, considerando la obligada presencia de paleocauces, su ocurrencia en el subsuelo puede interpretarse como intermitente y en forma de lentes interdigitados.



En las llanuras intermontanas y en las planicies costeras, la unidad de ocurrencia preferencial corresponde con sedimentos actuales compuestos por limo y arcilla. Aunque su distribución es muy amplia, su ambiente de depósito no es muy claro ya que puede corresponder con depósitos aluviales-fluviales o con unidades formadas en su totalidad por procesos aluviales, siendo en este último caso, solo una remoción de material sedimentario por cualquier agente erosivo y de transporte. Esta unidad puede alcanzar espesores de varias decenas de metros.

Por último, las zonas de interacción entre los ambientes sedimentarios continentales y los ambientes sedimentarios marinos generan productos de mezcla en los márgenes costeros. Esta mezcla es favorable para la depositación de sedimentos limo-arcillosos típicos de ambientes lacustres-palustres.

4.7 HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

4.7.1 Actualización piezométrica

La definición de áreas de recarga y descarga, y consecuentemente trayectorias de flujo de agua subterránea, puede ser lograda mediante diversos indicadores. Uno de ellos es la medición de los niveles piezométricos por medio de los cuales no solo es posible identificar estas zonas sino también componentes verticales de flujo subterráneo, ascendentes y descendentes.

Para el acuífero San José de Guaymas, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) cuenta con una red piezométrica que opera desde 1995 y hasta la fecha realiza a cabo campañas anuales para la medición de niveles, presentando información de 1995 a 1997 y del 2000 al 2011, siendo la información de los últimos años la más completa. En el acuífero se ha tomado información piezométrica desde 1975, sin embargo no se cuenta con esas bases de datos y además, la nomenclatura actual de los pozos ha cambiado por lo que es difícil establecer una correlación con las bases de datos actuales.



**Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.**



Para obtener las curvas de isovalores de profundidad y elevación del nivel estático, se utilizó la información generada en el 2009 por IDEAS y la información proporcionada por la CONAGUA.

La red piezométrica se ha venido integrando desde el año 1995, iniciando con las mediciones de la profundidad al nivel estático de 42 aprovechamientos.

Sin embargo en el 2008 el ITSON, realizó el censo de aprovechamientos con un total de 157 obras, de los cuales solamente en 79 se obtuvo la profundidad al nivel estático. En el 2009 IDEAS realizó el censo de 101 aprovechamientos, y solamente fue posible medir el nivel estático a 92 aprovechamientos (Figura 4.13).

Finalmente en el 2011 CONAGUA estableció un red de monitoreo de 114 aprovechamientos, de los cuales solamente en 88 se realizó la medición de la profundidad al nivel estático, ya que varios no se pueden medir, por lo que se ha agregados otros pozos para continuar con el monitoreo del acuífero, en este año se agregaron 27 aprovechamientos a la red piezométrica.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

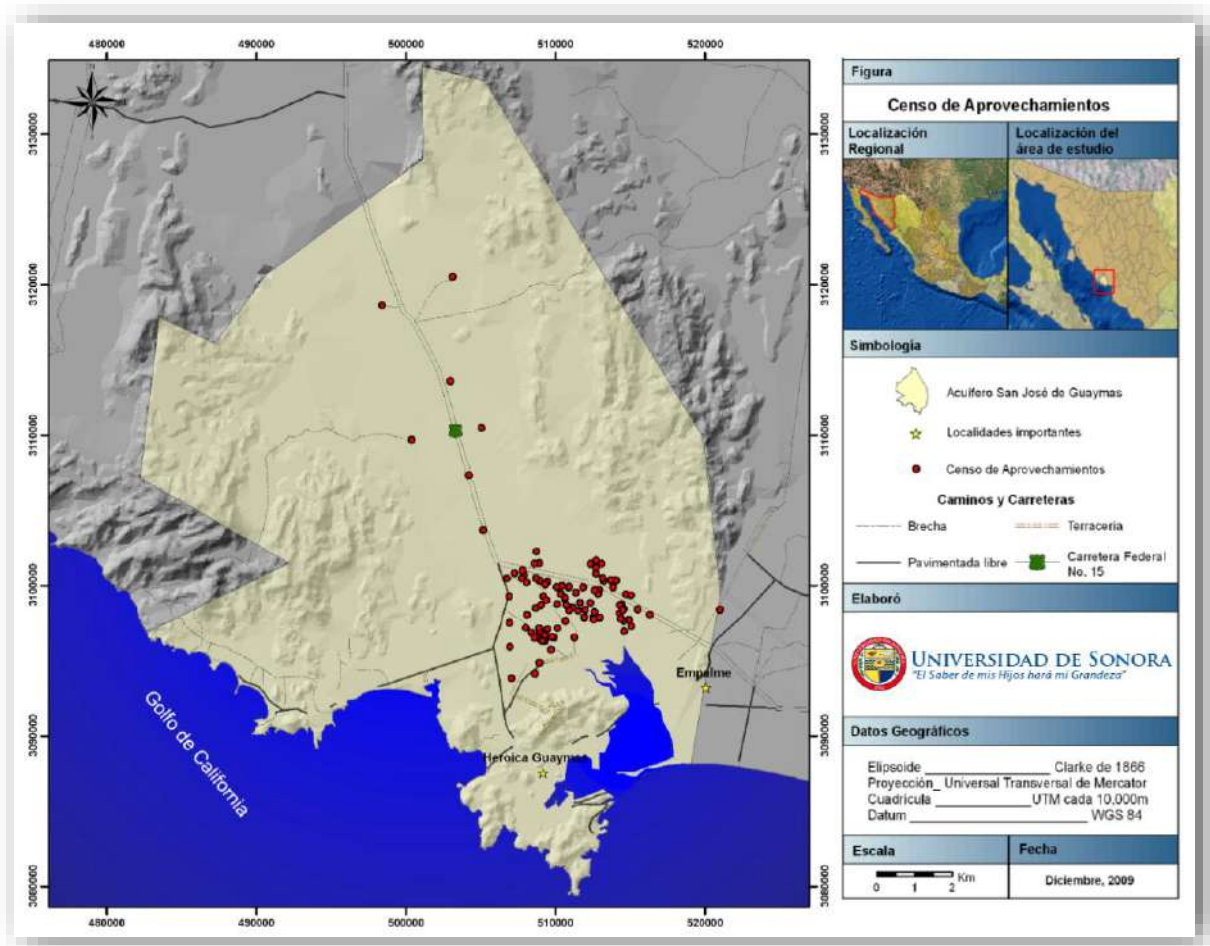


Figura 4.13. Localización aprovechamientos censados (IDEAS, 2009).

De acuerdo al censo realizado por IDEAS en el 2009, existen 74 pozos someros (norias) que representan el 73%, y 27 pozos profundos, representando el 27% (Figura 4.14).

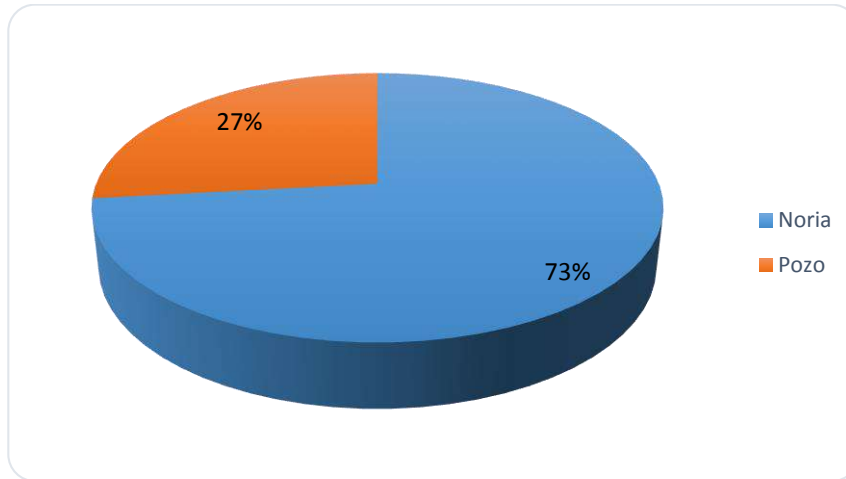


Figura 4.14. Tipos de Aprovechamientos.

En lo referente al uso que presentan los aprovechamientos subterráneos, el agrícola predomina (52%), seguido por el uso doméstico (9%). En cuanto a usos múltiples, el uso pecuario-doméstico se encuentra en el 4% de las captaciones y al agrícola-servicios en el 1%. El 34% restante corresponde a pozos que se encuentran inactivos, ya sea temporal o definitivamente (27%) y a captaciones en las que se ignora cuál es su uso (7%) (Figura 4.15).

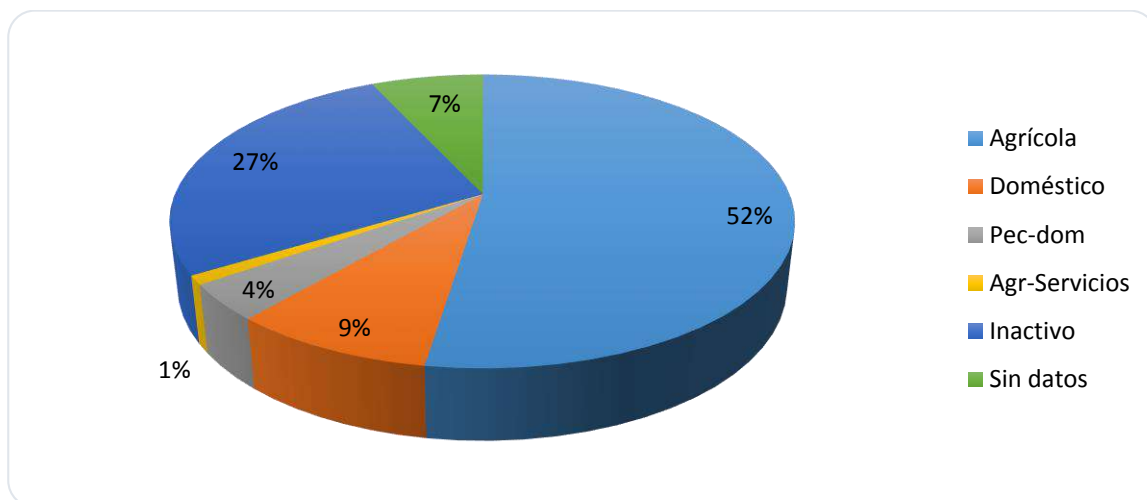


Figura 4.15. Usos del agua.



4.7.2 Profundidad del Nivel Estático

Para el acuífero San José de Guaymas se cuenta con una base de datos de nivel estático con información de los años 1995, 1996, 1997, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 y 2011. En la elaboración de los planos de evolución de la profundidad y elevación del nivel estático, se tomaron solo los aprovechamientos que presentan datos para los años 1995, 1997, 2000, 2003, 2006, 2009, 2010 y 2011, los cuales se concentran en la parte sureste del acuífero.

De acuerdo a las mediciones realizadas por IDEAS en el 2009, las mayores profundidades al nivel estático se encuentran en la parte norte del acuífero, y las menores hacia el sur. La mayor profundidad se encontró a 82.16 m, en el predio La Zorra ubicado 27 km al noroeste de la población de San José de Guaymas; y la menor a 4.2 m, registrada en el predio El Presidio a 5 km al noreste del mismo poblado (Figura 4.16).

La evolución de la profundidad al nivel estático se muestra en la figura 4.17. En ella se observa que el nivel se mantiene estable en los años 1995 a 2009. Su profundidad varía entre 6 y 36.72 m, donde las mayores se localizan hacia la parte norte de San José de Guaymas, y disminuyen al sur, rumbo al Golfo de California.

La profundidad al nivel estático en octubre del 2001, varía entre 4.18 a 36.36 metros muy similar a los registrados en el 2009. En general, la mayoría de las profundidades al nivel estático se encuentran de los 10 a los 25 metros, donde la profundidad menor se presenta en el aprovechamiento con clave 127-SJG, el cual se localiza al norte del estero El Rancho, y las mayores profundidades se encuentran hacia la parte norte de San José de Guaymas, presentándose la mayor en el pozo 110-SJG al norte del área de estudio (Figura 4.18 y 4.19).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

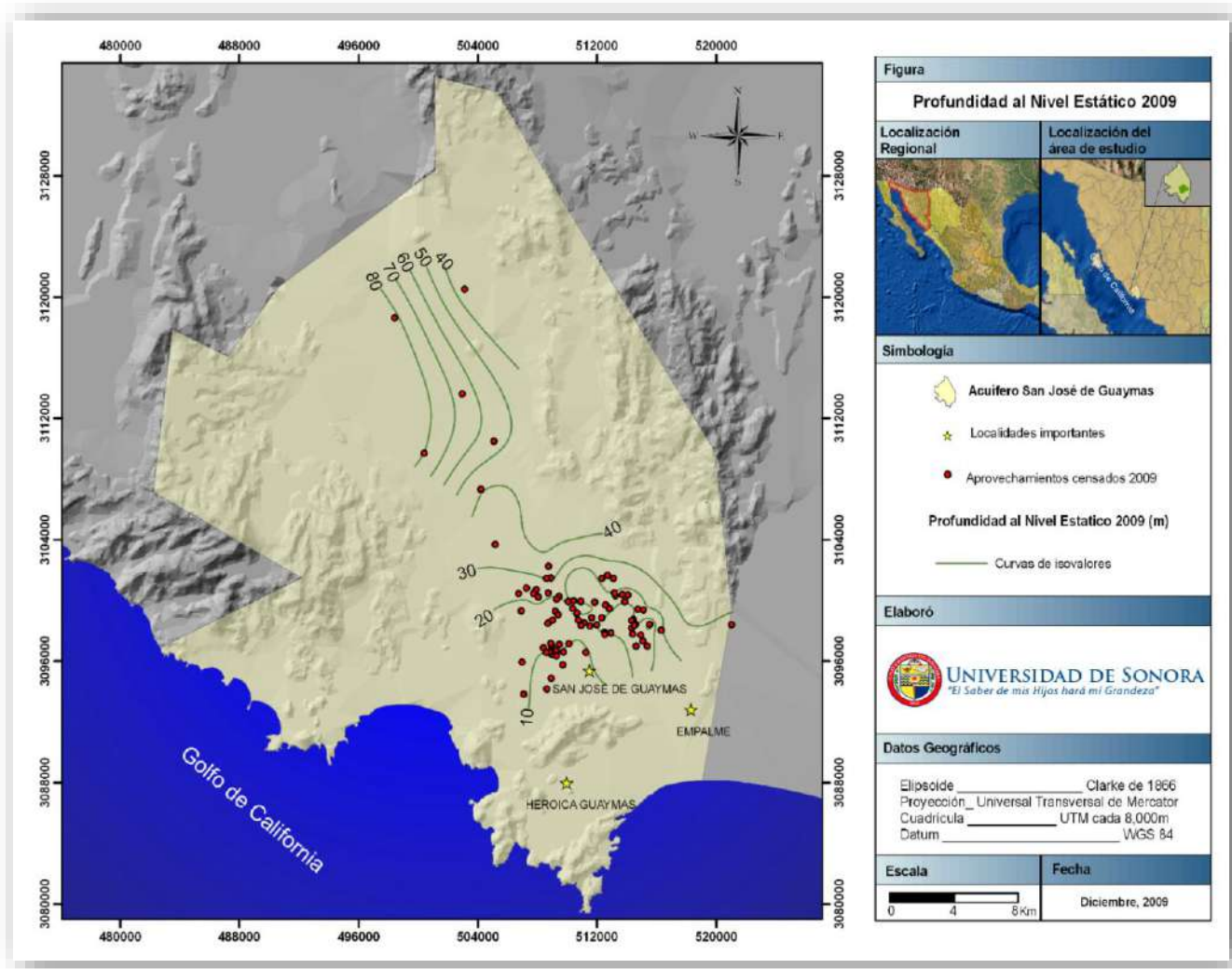


Figura 4.16. Profundidad al nivel estático, 2009 (m). Fuente IDEAS, 2009.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

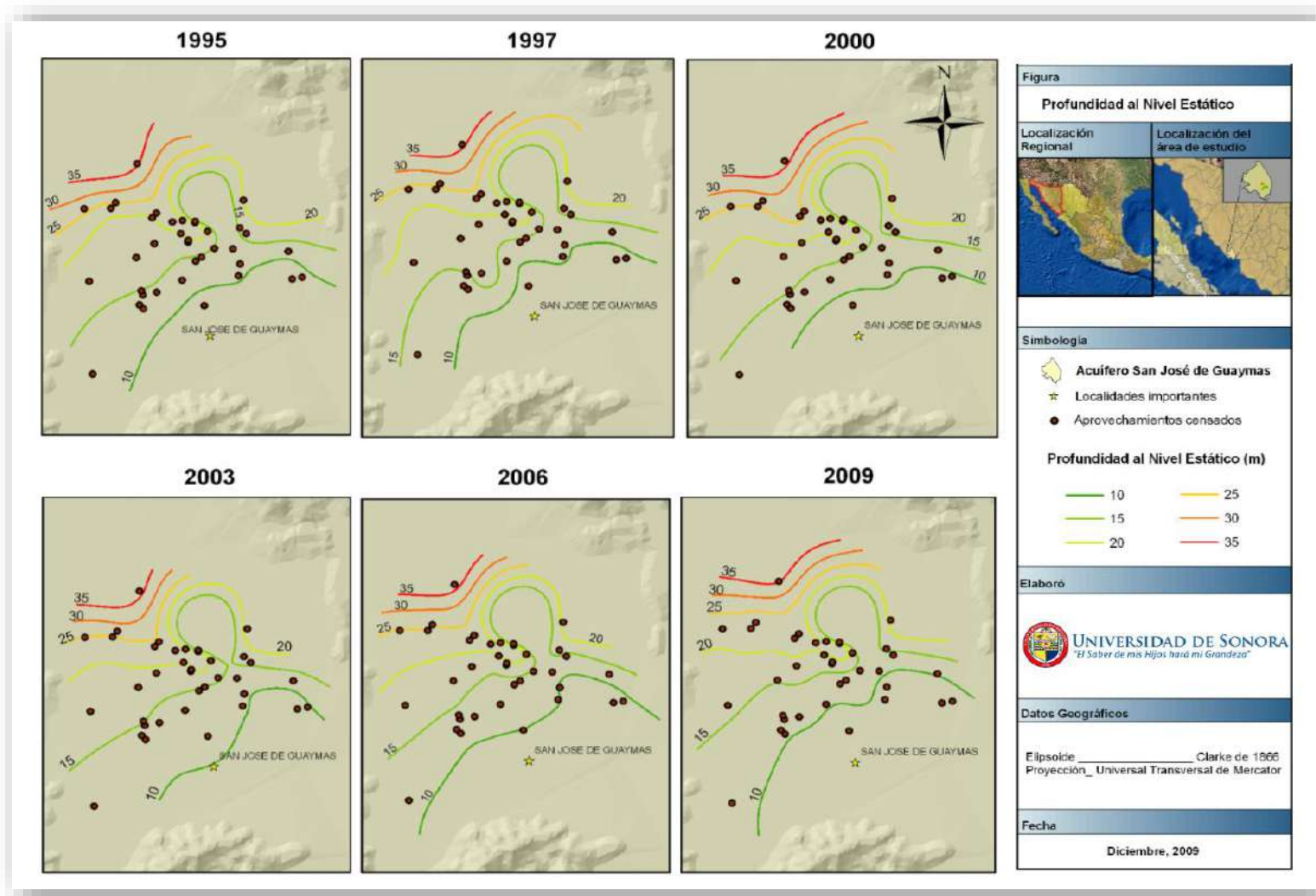


Figura 4.17. Evolución de la profundidad al nivel estático (m). Fuente IDEAS, 2009.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

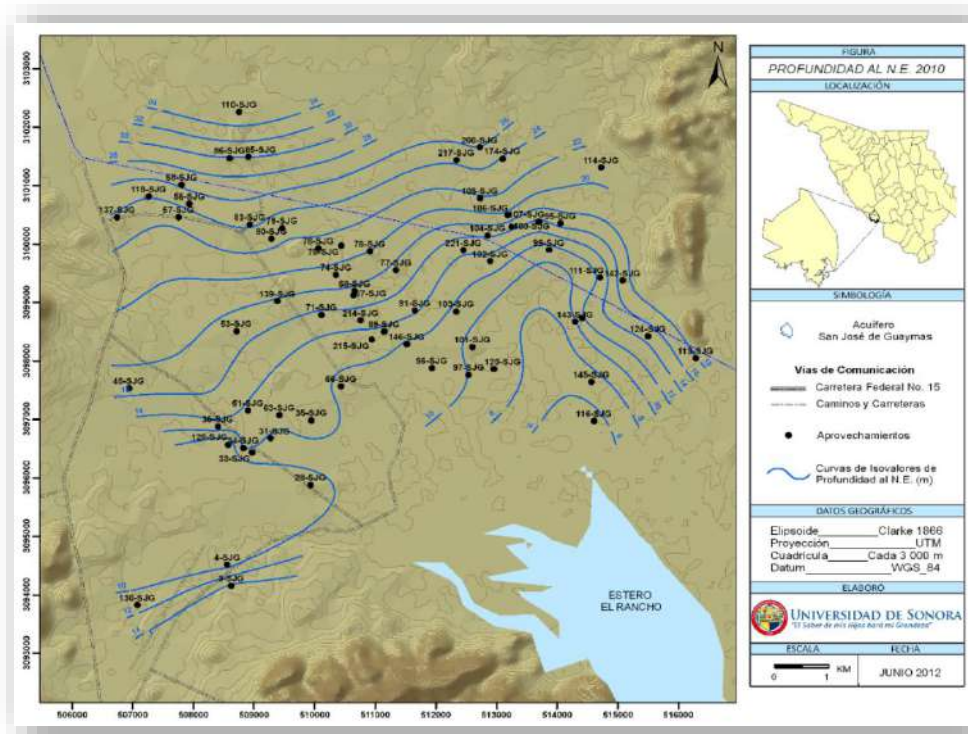


Figura 4.18. Profundidad al nivel estático 2010.

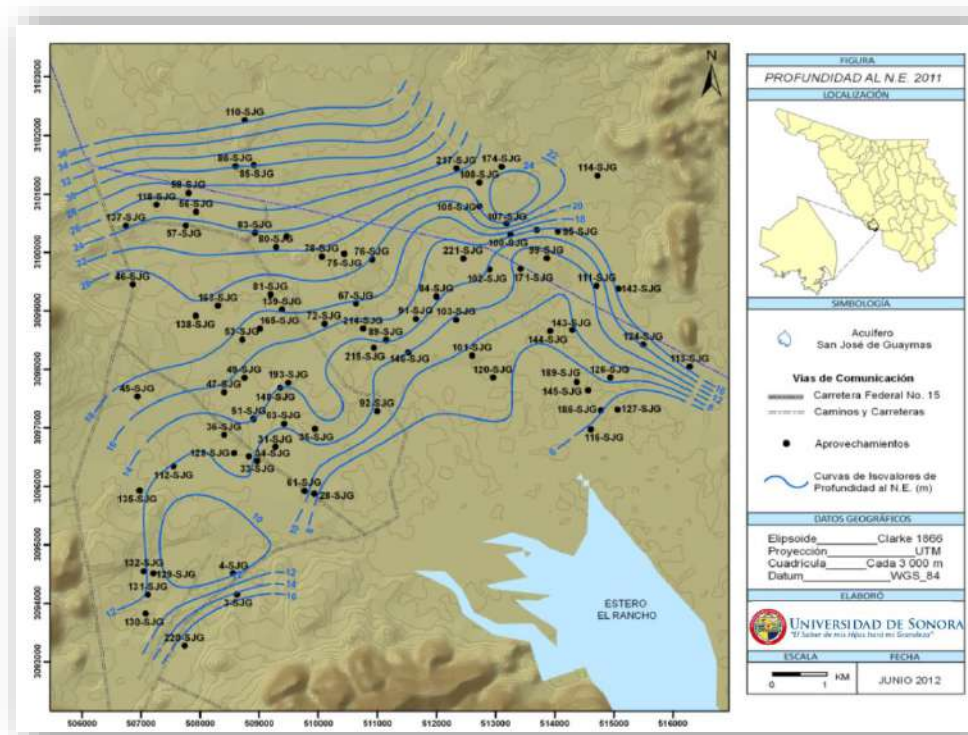


Figura 4.19. Profundidad al nivel estático 2011.



4.7.3 Elevación del Nivel Estático

Para determinar la elevación del nivel estático se utilizó la información generada en la nivelación de brocales. En las captaciones donde no se tiene nivelación, se utilizaron las curvas topográficas proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), de manera que fue posible realizar interpolaciones mediante el programa Arcview GIS 3.2 para obtener las elevaciones correspondientes.

Para configurar la distribución de las curvas de elevación del nivel estático (2009), se tomaron los datos de todos los aprovechamientos censados por IDEAS (Figura 4.20). Las mayores elevaciones del nivel estático se presentan en la porción norte del acuífero, disminuyendo hacia la parte sur, donde se observa un comportamiento distorsionado de las curvas, producto de las condiciones de extracción y de la interacción entre el agua dulce y salada en la zona de interfase.

El flujo subterráneo lleva una dirección general norte – sur, hacia la línea de costa. En la zona de mayor concentración de pozos, el flujo lleva dirección oeste – este, hacia los campos agrícolas, lo que sugiere que la extracción que se presenta en los campos es soportada por el aporte del arroyo Nochebuena.

Aunque en la zona de mayor extracción se presentan abatimientos hasta los 6 m bajo el nivel del mar, no es clara la presencia de intrusión marina dado que, de acuerdo a la piezometría, se presentan zonas de descarga de agua dulce hacia el estero El Rancho, sobre todo en la descarga del arroyo San José (Nochebuena), y zonas de posible intrusión cuyo volumen no puede cuantificarse debido a los bajos gradientes hidráulicos y las oscilaciones en las elevaciones del nivel estático que se presentan.

Con base en las elevaciones del nivel estático obtenidas, se trazaron las curvas de isovalores de elevación del nivel estático en diferentes años, de donde se desprende que en la mayoría de los años se registra la menor elevación en el aprovechamiento ubicado en el predio El Rodeo y la mayor en el predio El Sueño. Las elevaciones del nivel estático en el acuífero para los años **1995 al 2009** oscilaban entre -7 y 2 msnm (Figura 4.21).



Sin embargo la elevación del nivel estático de **octubre del 2011**, oscila entre -4.0 a 8.432 m.s.n.m. Con base en las elevaciones del nivel estático obtenidas, se trazaron las curvas de isovalores de elevación del nivel estático, de donde se desprende que la menor elevación se registró en el pozo 165-SJG, el cual se encuentran hacia el extremo oeste del acuífero. La mayor se tiene en el aprovechamiento con clave 135-SJG en la parte suroeste del acuífero (Figura 4.22).

Se observa la formación de varios conos de abatimiento en la parte central del acuífero y al norte de San José de Guaymas, debido a la gran extracción que presentan los aprovechamientos localizados en esta zona del acuífero. Las direcciones de flujo son varias, en la parte norte se presenta una con dirección norte-sur, otras son casi norte a sur y una es de oeste a este. En la parte central, donde se encuentran dos de los conos de abatimiento, se presenta una dirección de suroeste a noreste, otra sur a norte y más hacia el sur son casi de oeste a este, otra de este a oeste y una más de norte a sur. En la parte este las direcciones de flujo son hacia la entrada del estero El Rancho.

De manera general las elevaciones del nivel estático se han mantenido desde 1995 a al 2011, con pequeñas oscilaciones pero manteniéndose con valores de -4.0 a -6.0 msnm y de 8.0 msnm.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

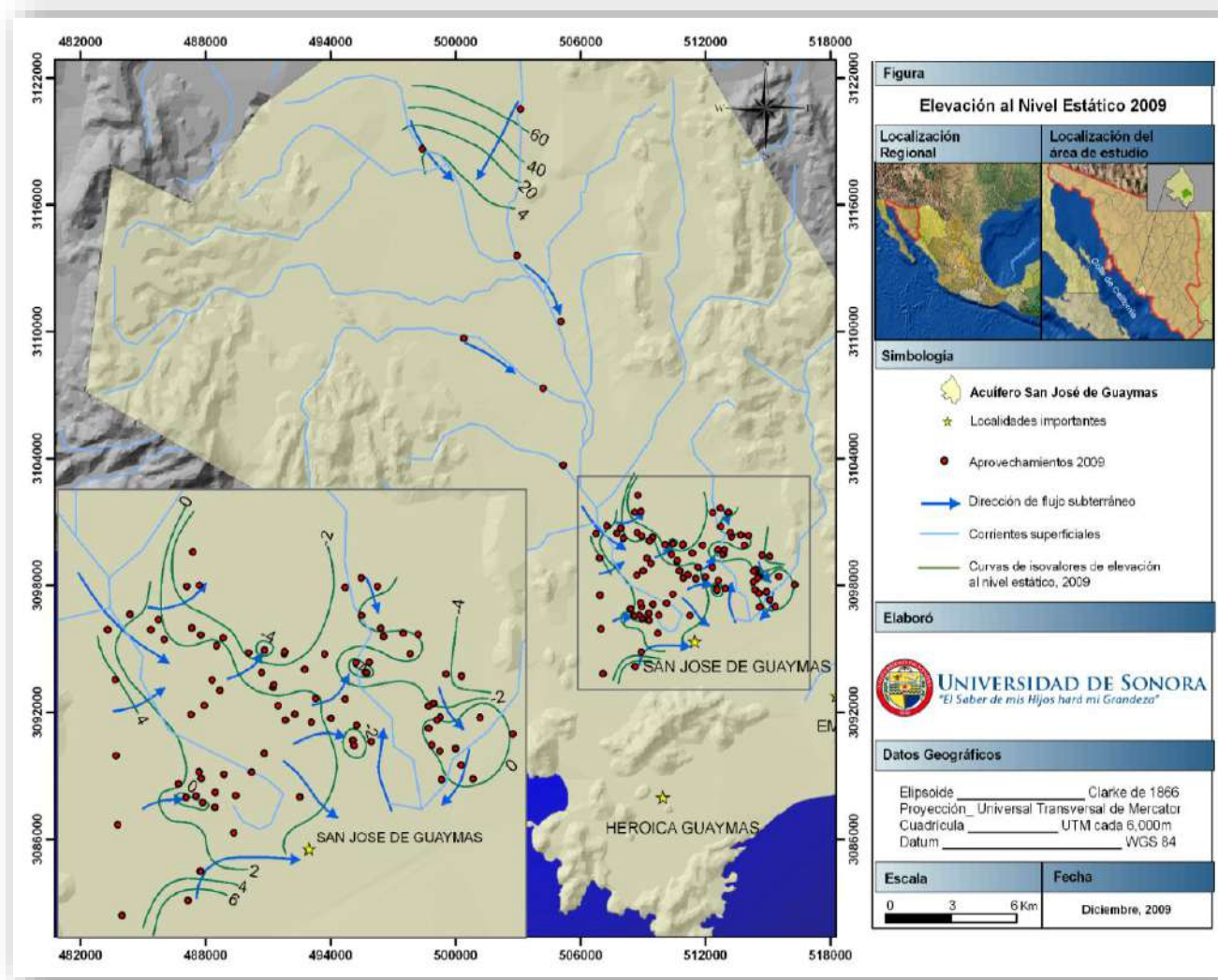


Figura 4.20. Elevación del nivel estático y dirección de flujo subterráneo 2009. Fuente IDEAS, 2009.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

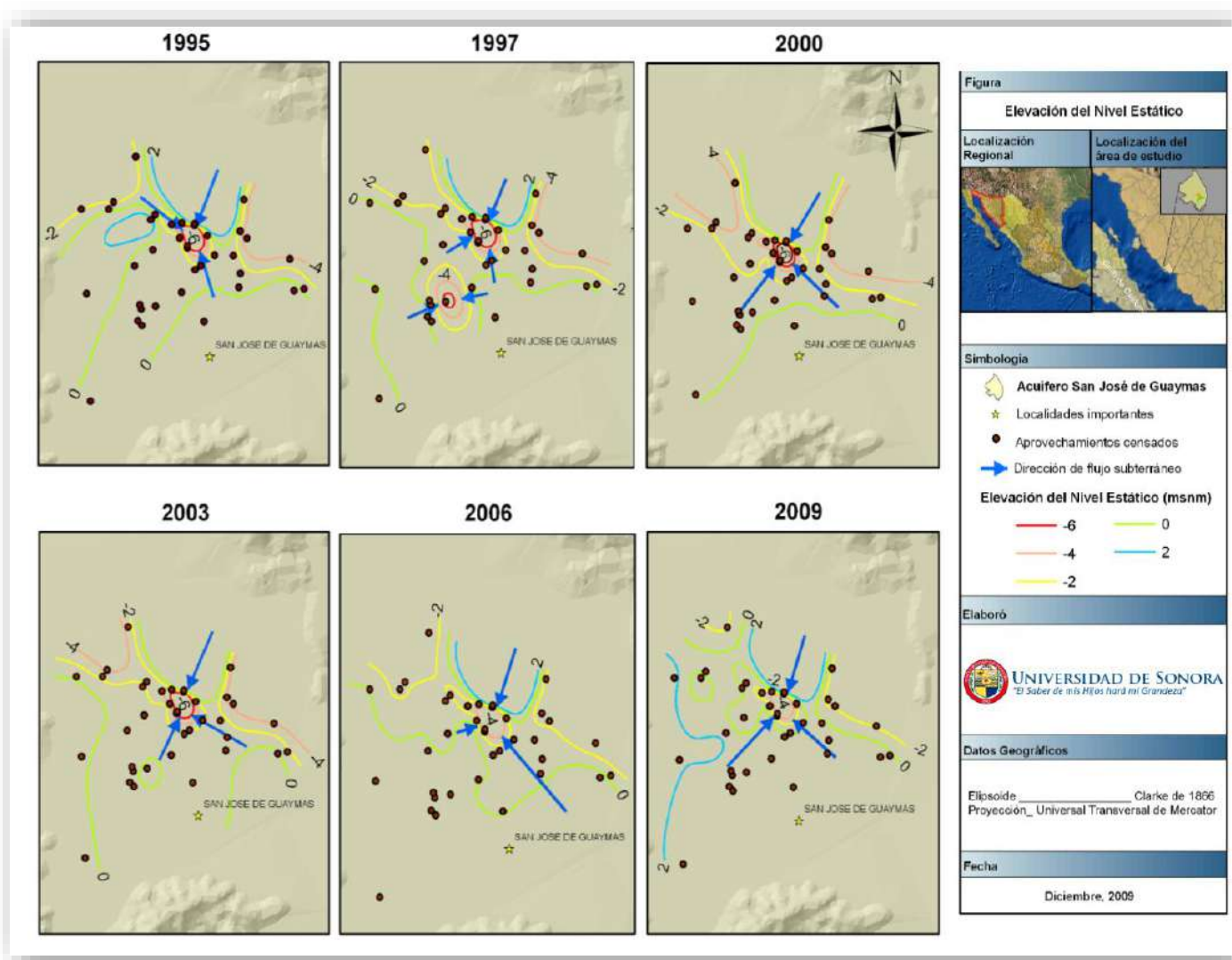


Figura 4.21. Evolución de la elevación al nivel estático (m.s.n.m.). Fuente IDEAS, 2009.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

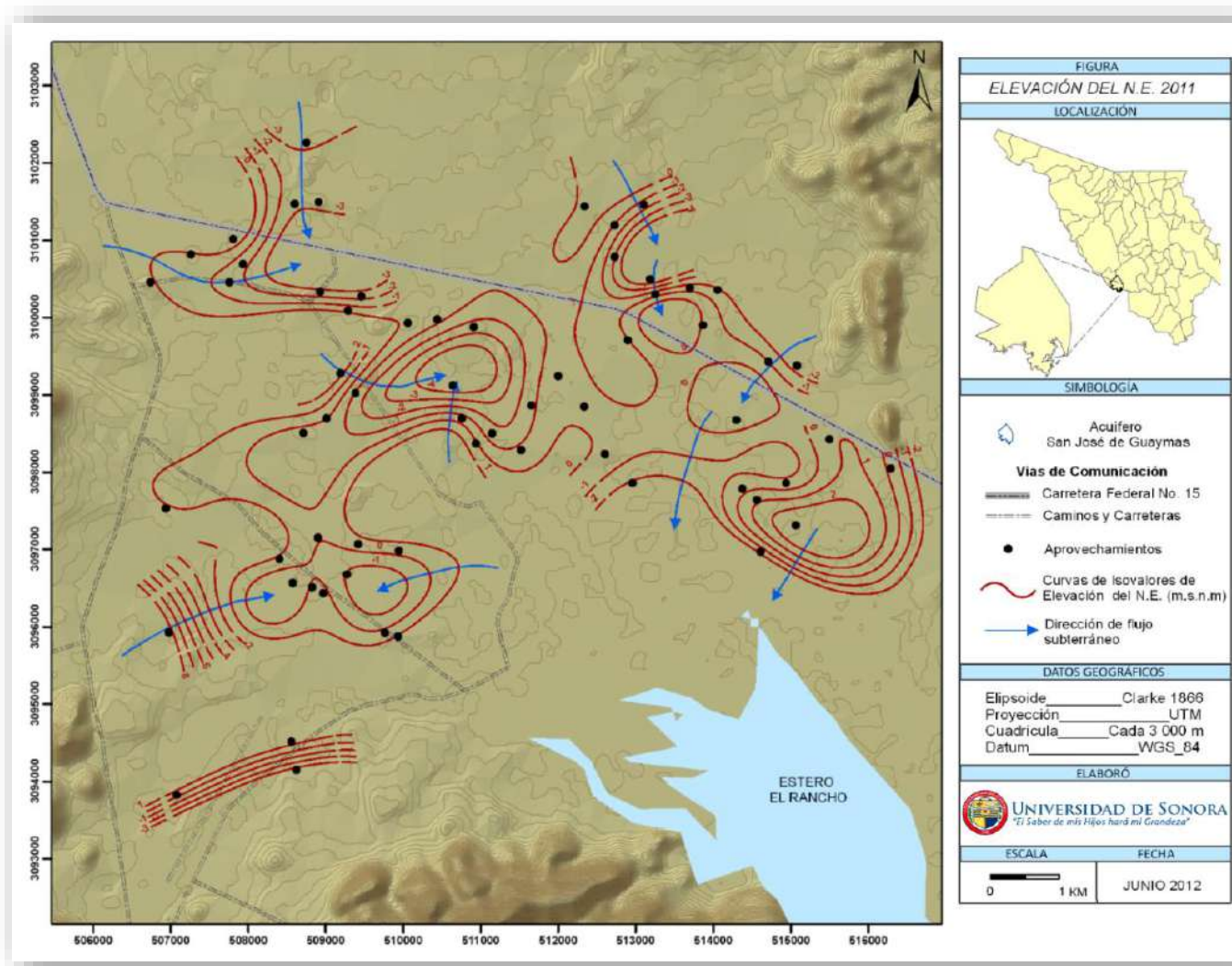


Figura 4.22. Elevación del nivel estático y dirección de flujo subterráneo, Octubre 2011.



4.7.4 Evolución del Nivel Estático

Los periodos de evolución del nivel estático considerados son los siguientes: 1995-1997, 1997-2000, 2000-2003, 2003-2006, 2006-2009 y 2009-2011, asimismo para los años 1995-2005 y 1995-2009. Se consideraron solo 37 aprovechamientos concentradas en la parte sureste del acuífero para configurar la evolución del nivel estático en los diferentes periodos, pues son los que cuentan con información consistente para todos los años.

En la figura 4.23 se puede ver que para el periodo 1995-1997 se presentan algunos abatimientos puntuales hasta de 5 m, aunque en términos generales predominan condiciones de estabilidad definidas por la curva 0. El mayor abatimiento para ese periodo se presenta en un pozo somero ubicado en el predio Los Chinos, a 2.5 km al noroeste de San José de Guaymas, el cual presenta para el siguiente periodo de análisis (1997-2000) una recuperación de 6.24 m. Esta variación posiblemente se debe a condiciones locales de extracción o a error en la medición o captura en este punto en alguno de los años. Sin embargo, las condiciones generales para el periodo 1997-2000 son de abatimiento en la mayor parte del área, hasta de -1 m.

En el período de 2000-2003 se registró solo un abatimiento de 3 m en un aprovechamiento ubicado en el predio San Carlos, localizado a 1 km al norte de San José de Guaymas. En términos generales, durante este periodo predomina la estabilidad en el nivel estático. Para los períodos de 2003-2006 y 2006-2009, se observa una tendencia a la recuperación en toda el área. No se presentaron abatimientos, solo recuperaciones entre 1 y 3 m.

En la figura 4.24 se muestra la evolución de la profundidad al nivel estático para el período de 1995 al 2005. En este periodo de 10 años, se observa la presencia de un abatimiento de 3 m en un pozo ubicado en el predio San Marcos, a 5 km al norte-noroeste de San José de Guaymas, y una recuperación de 2 m en la captación ubicada en el predio San Antonio, a 4.5 km al norte-noreste del mismo poblado. No se observa una tendencia clara del predominio de abatimientos o recuperaciones, probablemente debido a la hidrodinámica del acuífero buscando la estabilidad al momento de realizar las mediciones. En este sentido, se puede inferir que el acuífero presenta condiciones de equilibrio.



En la figura 4.25 se observan las curvas de isovalores de evolución del nivel estático para todo el periodo de datos: de 1995 al 2009. A diferencia del periodo 1995 – 2005, el cono de abatimiento que se presenta en la parte centro-este de la figura tiende a disminuir, con un valor máximo de abatimiento de -2 m. La recuperaciones son mayores, alcanzando hasta dos metros más con respecto al periodo anterior. Esto implica que en los últimos cuatro años el acuífero presenta una tendencia a recuperarse.

En la figura 4.26, se presenta la evolución de la profundidad al nivel estático del periodo del 2009 a 2011 con la información disponible de 56 aprovechamientos, ya que eran los que contaban con información para ese periodo. La mayoría de los aprovechamientos presentan abatimientos estos se encuentran entre -0.25 a -2.5 metros, se observa 2 conos de abatimiento, el primero se localiza en la parte noreste del acuífero en el pozo 106-SJG con abatimientos de -2.5 m, el otro cono de abatimiento se localiza en la parte noroeste en el 107-SJG, con abatimiento de -2.0 m. Solo en 10 aprovechamientos se presentan recuperaciones, estas varían de 0.05 a 0.88 metros y se distribuyen principalmente en la parte norte y central, la mayor recuperación se presenta en el pozo con clave 83-SJG y la menor en el 86-SJG ambos localizados en la parte norte.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

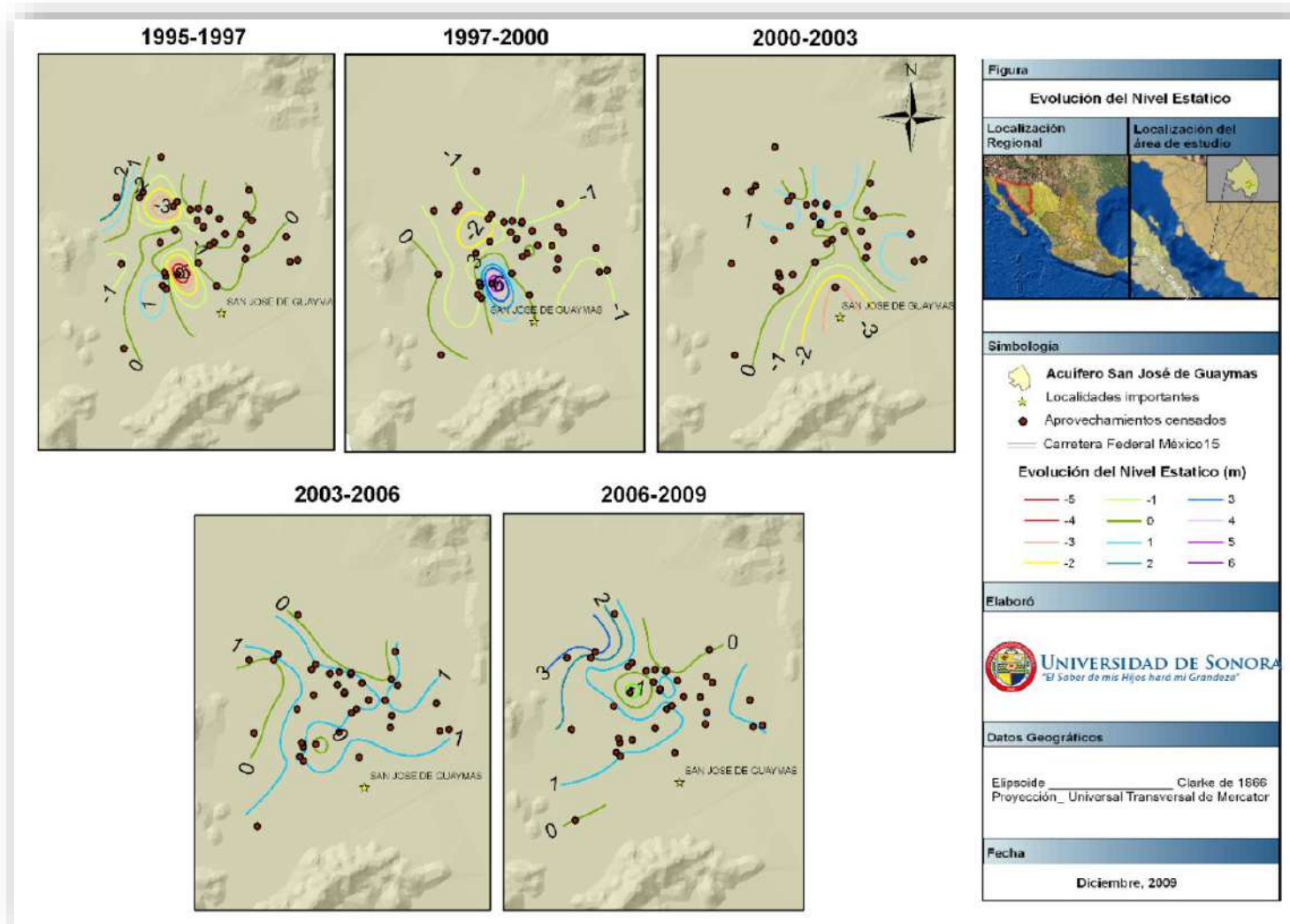


Figura 4.23. Evolución del nivel estático para diferentes periodos (Fuente IDEAS, 2009).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

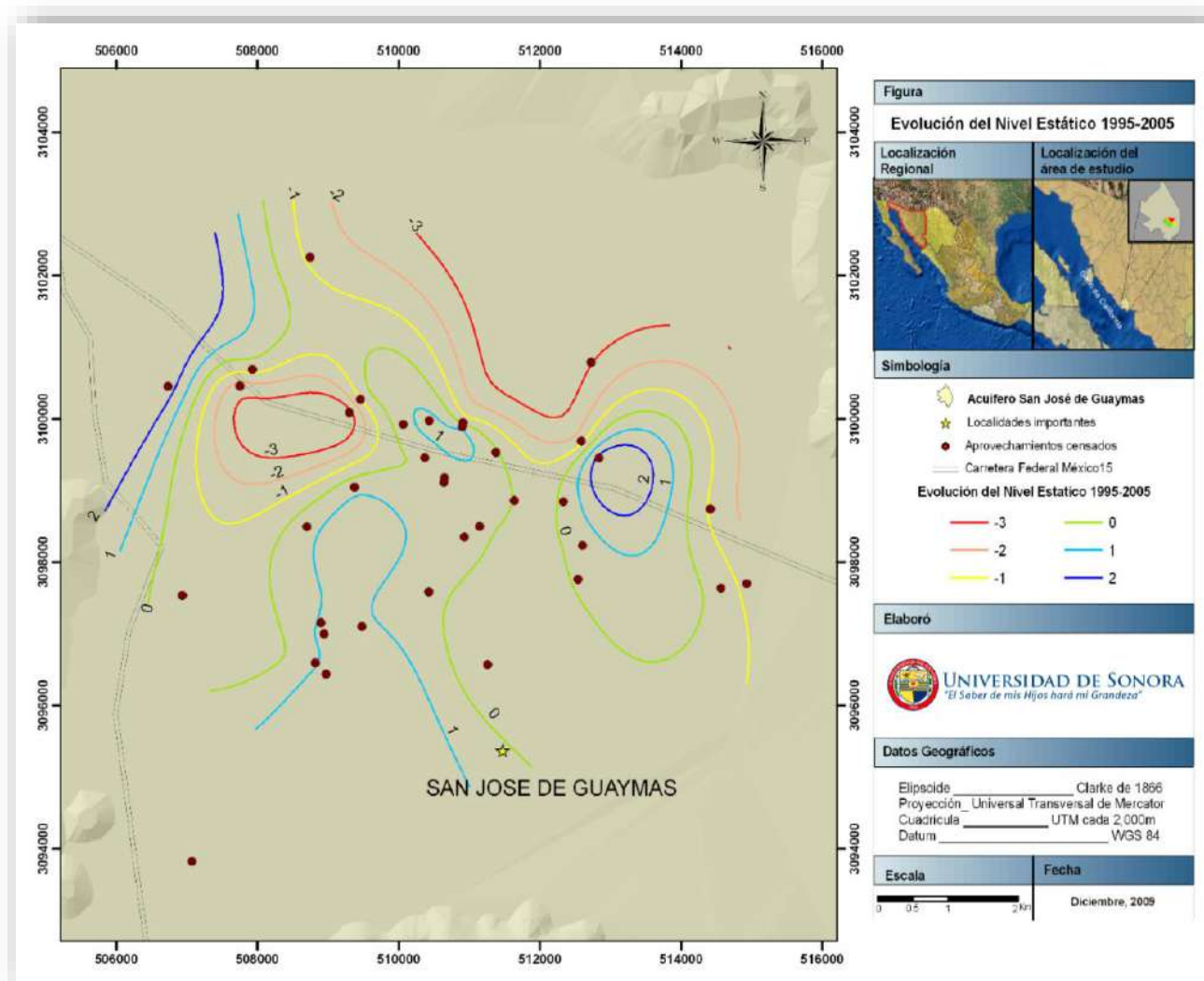


Figura 4.24. Evolución del nivel estático en el periodo 1995 – 2005 (Fuente IDEAS, 2009).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

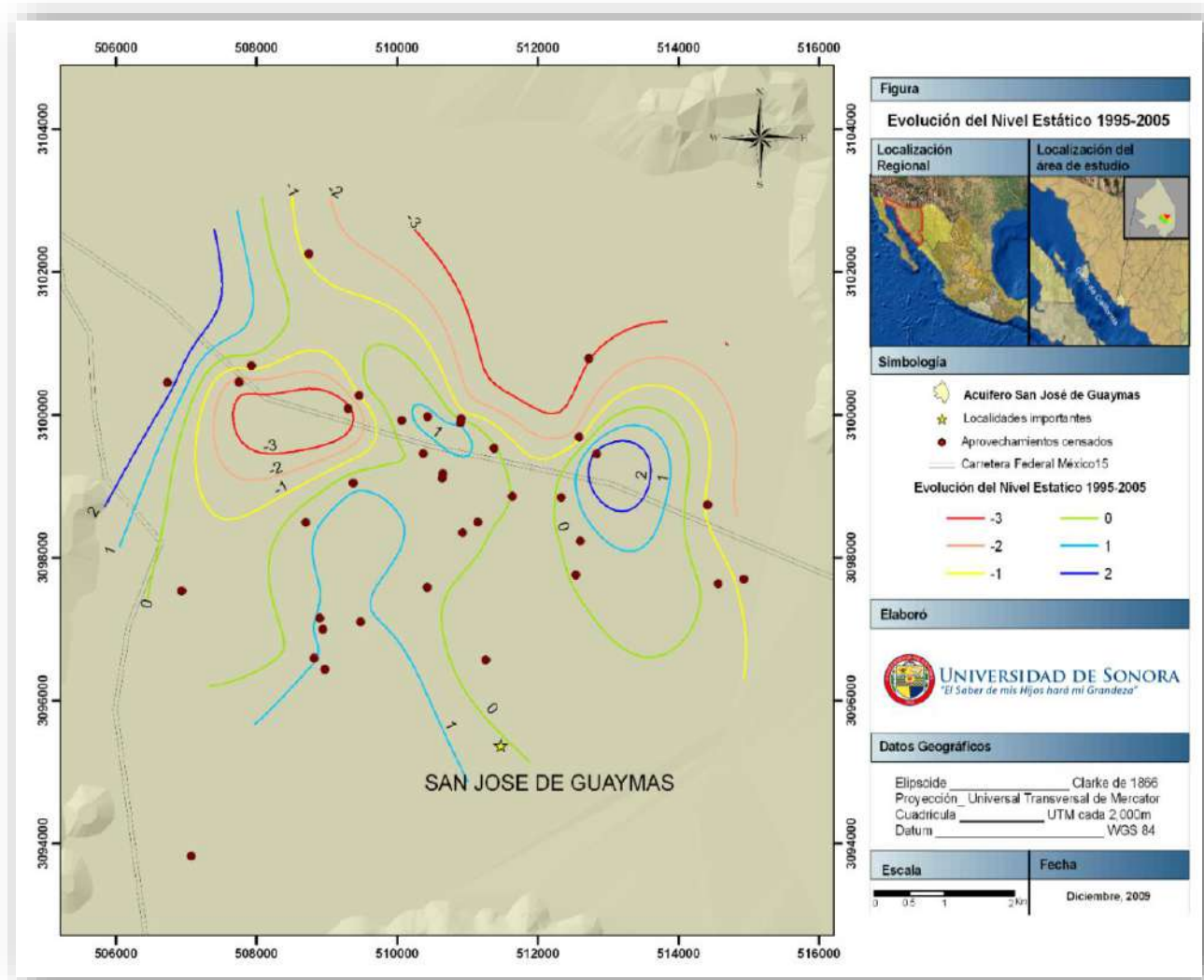


Figura 4.25. Evolución del nivel estático en el periodo 1995 – 2009 (Fuente IDEAS, 2009).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

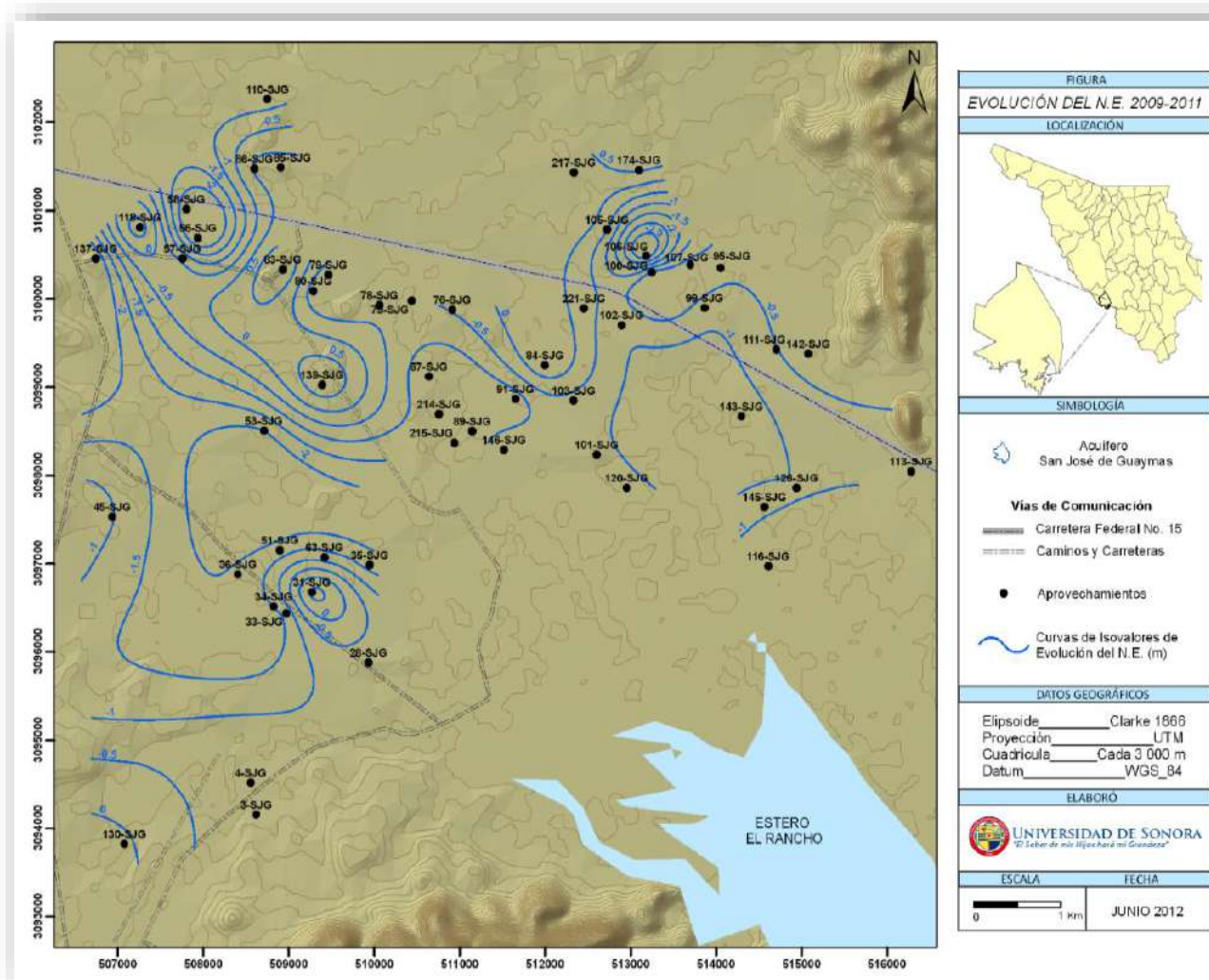


Figura 4.26. Evolución del nivel estático en el periodo 2009-2011.



5. INTEGRACIÓN DE LA GEOLOGÍA DEL SUBSUELO

5.1 Sondeos Electro-Magnéticos en el Dominio del Tiempo

Para el área de estudio, se cuenta con trabajos geofísicos realizados por diferentes autores. A partir de esta información, se analizaron sus resultados para complementar las condiciones de los objetivos buscados en este trabajo hidrogeológico. En primer lugar se consideró necesario utilizar los resultados obtenidos por los estudios realizados (CEA, 2012 e ITSON, 2008), en los cuales se utilizó el método geofísico de exploración denominado Sondeo Transitorio Electromagnético en el dominio del tiempo (TDEM por sus siglas en inglés), que tiene la mayor eficiencia resolutive y gran sensibilidad a la presencia de agua o de materiales saturados, comparado con otros previamente realizados para la misma área.

Para este trabajo de tesis, se tomaron en cuenta ambos estudios (2008 y 2012) (Figura 5.1), tomando 20 sondeos electromagnéticos que corresponden al año 2012 (Tabla 5.1) cuya localización fue determinada de acuerdo con la distribución de los afloramientos de las unidades geológicas y las tendencias estructurales. La finalidad del estudio fue integrar la mayor cantidad de elementos geológicos e incrementar la certidumbre en la interpretación de las unidades geoeléctricas del subsuelo. El modelado dio como resultado una serie de perfiles geofísicos que fueron determinantes para obtener un mejor detalle de las características geométricas y físicas de las unidades hidrogeológicas en cada sitio.

5.1.1 Método Electromagnético

Con el método electromagnético aplicado (TEM), los modelos muestran una caracterización resistiva del subsuelo. Debido a la gran resolución vertical que se obtiene con esta técnica, en los perfiles resistivos es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas) que pueden asociarse a estructuras geológicas, cambios de facies y/o fracturamiento en la roca. Además, la presencia del agua influye en el valor medido provocando cambios importantes en la resistividad (que es el parámetro experimental de campo que se mide), lo que puede ser identificado también con este método.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

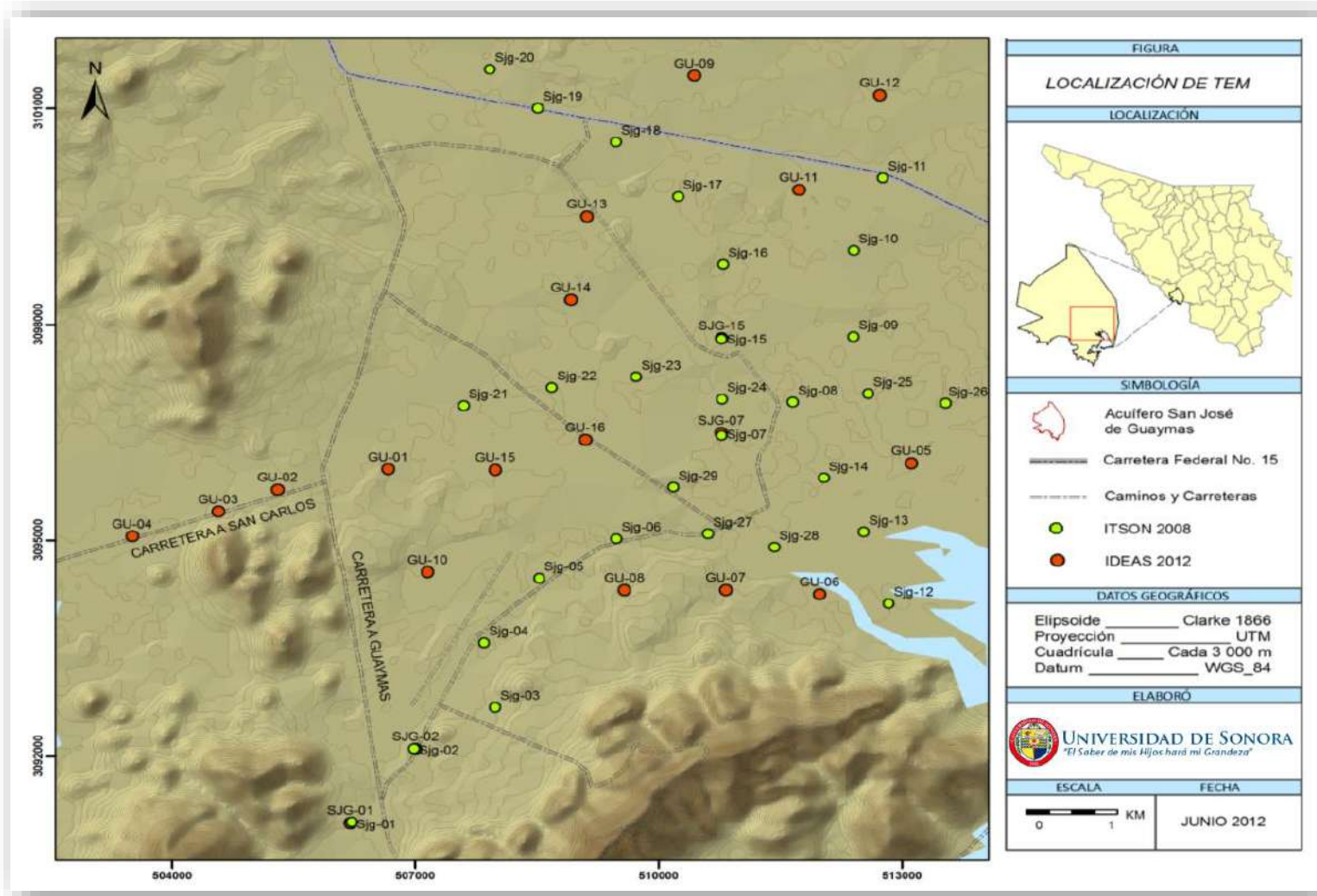


Figura 5.1. Mapa de distribución de TEM's exploratorios en el área de estudio (CEA, 2012).



Tabla 5.1. Coordenadas de los Sondeos electromagnéticos realizados (CEA, 2012).

COORDENADAS UTM WGS-84 ZONA 12N							
Nombre	X	Y	Elevación	Nombre	X	Y	Elevación
U-01	506665	3095989	2	U-11	511728	3099868	8
U-02	505302	3095705	5	U-12	512727	3101183	1
U-03	504572	3095400	9	U-13	509116	3099500	9
U-04	503513	3095057	2	U-14	508917	3098343	4
U-05	513115	3096073	2	U-15	507985	3095980	2
U-06	511987	3094249	4	U-16	509097	3096397	4
U-07	510827	3094313	14	SJG-01	506198	3091076	6
U-08	509578	3094309	20	SJG-02	507003	3092106	20
U-09	510440	3101452	9	SJG-07	510772	3096493	6
U-10	507150	3094559	3	SJG-15	510776	3097809	2

5.2 Ejecución e interpretación de Gravimetría

Otros trabajos geofísicos realizados en el estudio de 2012, utilizaron la gravimetría para la interpretación de las características a profundidad de la cuenca estudiada, principalmente su geometría. Por lo que se tomaron igualmente para complementar el entendimiento de la geología del subsuelo del área de estudio de esta tesis. Este método aprovecha las diferencias de la gravedad en distintos sectores de un área, la cual determina la aceleración (m/s^2) de un objeto que está cayendo a la superficie. En este contexto, los cuerpos rocosos del basamento bajo los sedimentos pueden aumentar la gravitación en una región determinada, ya que las rocas, que son de mayor densidad, aumentarán la aceleración en ese punto (Figura 5.2). La ubicación de las estaciones de gravimetría se presenta en la figura 5.3.

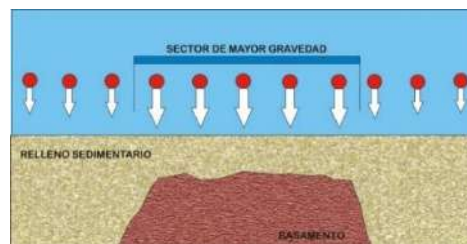


Figura 5.2. Aumento de la gravedad debido a la presencia del basamento en el subsuelo.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

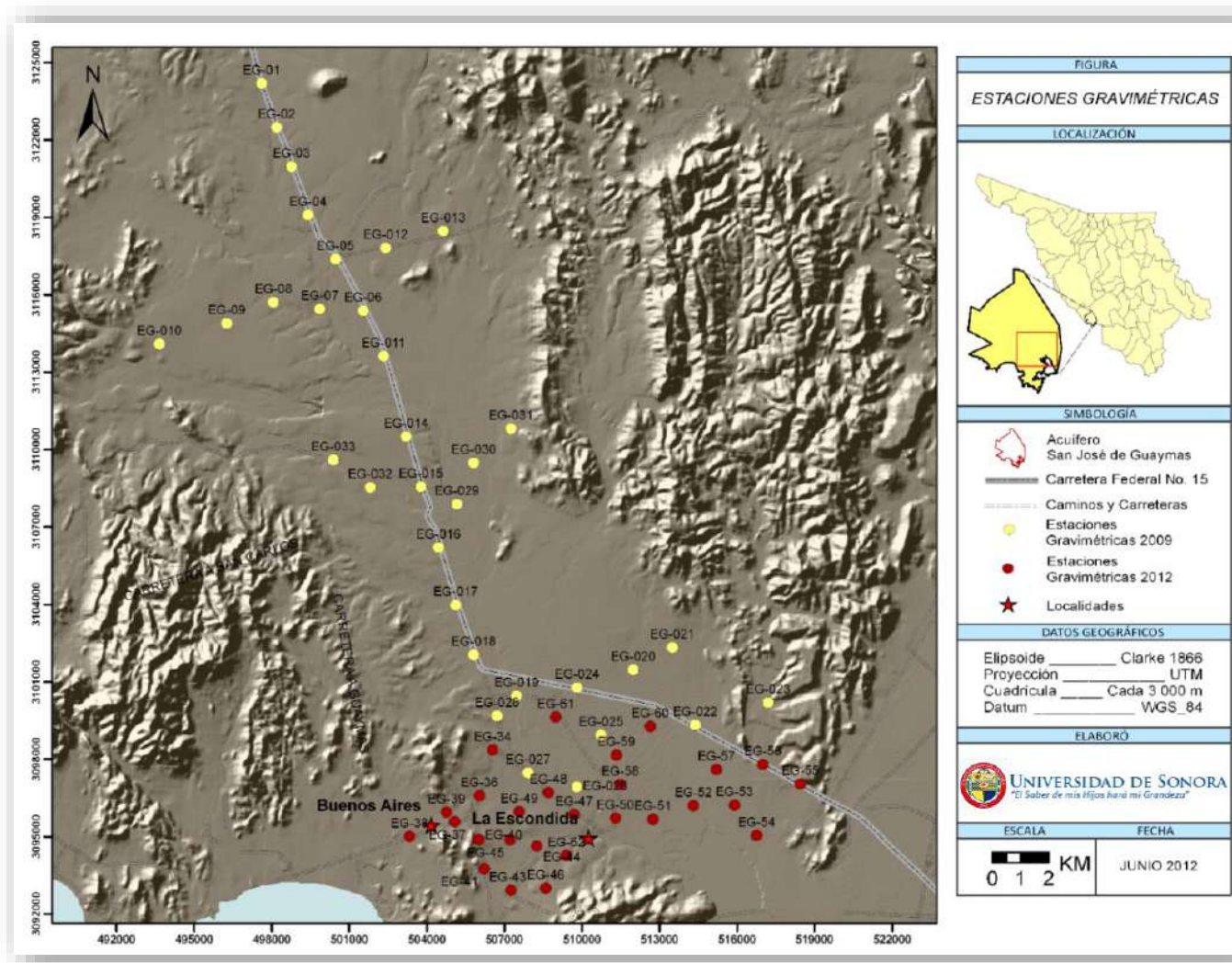


Figura 5.3. Localización de estaciones gravimétricas dentro del acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



Fotografía 1. Toma de lectura de campo en estación EG-34.



Fotografía 2. Toma de lectura de campo en estación EG-36.



Fotografía 3. Toma de lectura de campo en estación EG-46.



Fotografía 4. Toma de lectura de campo en estación EG-47.



Fotografía 5. Toma de lectura de campo en estación EG-57.



Fotografía 6. Toma de lectura de campo en estación EG-62.

La interpretación gravimétrica del estudio de tesis se aprecia en la figura 5.4 y 5.5.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

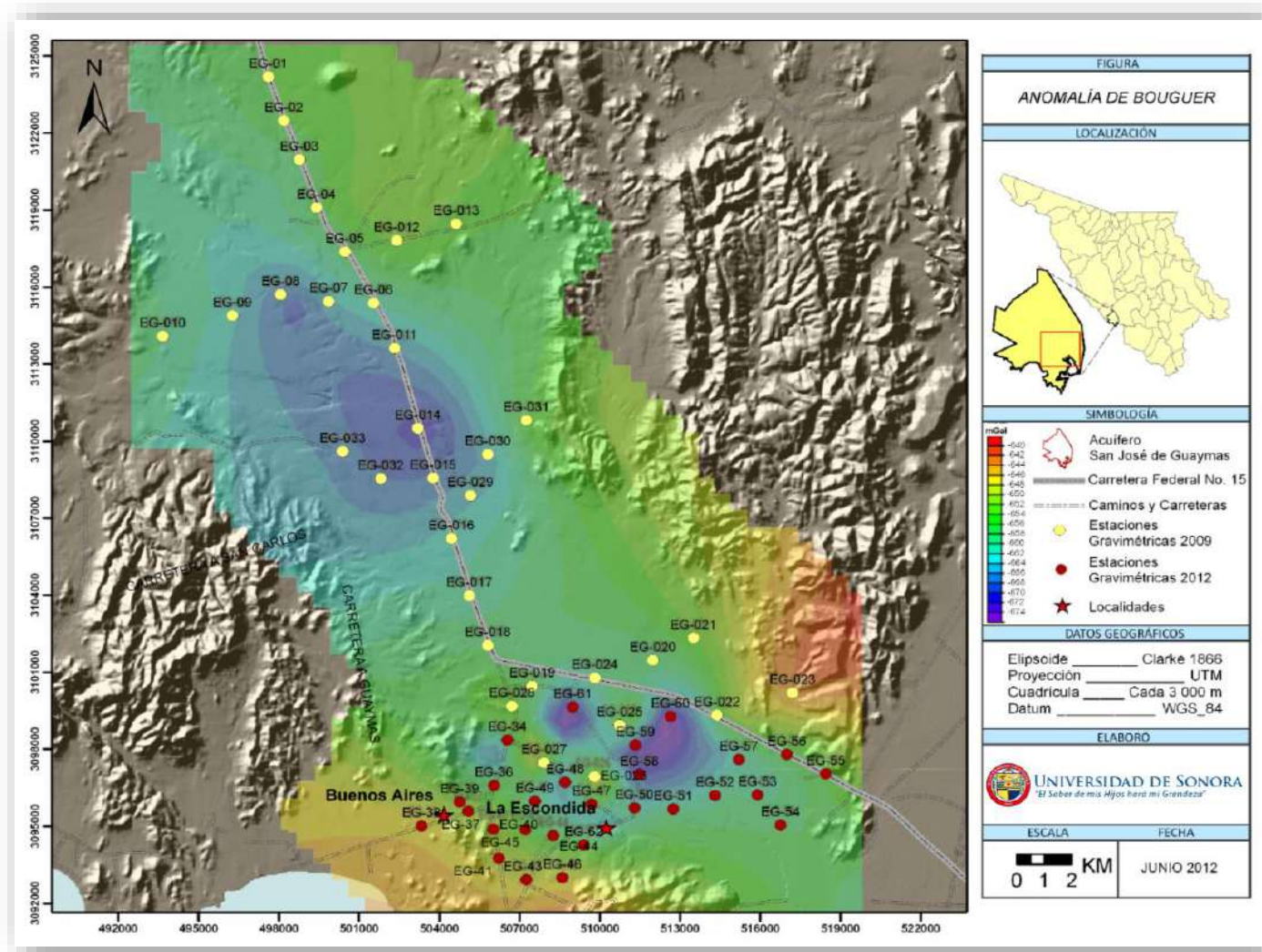


Figura 5.4. Plano de Anomalía de Bouguer integrado en el Acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

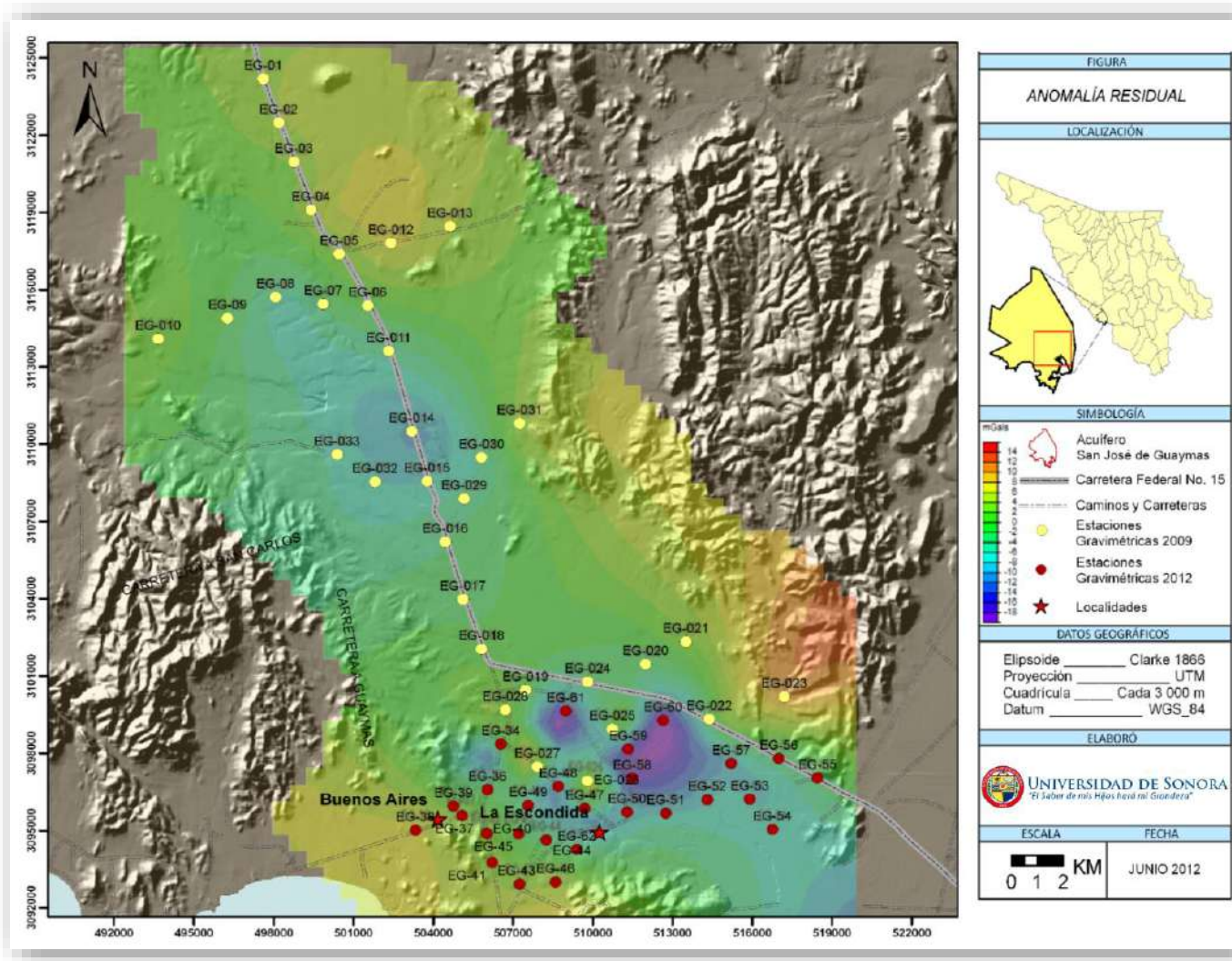


Figura 5.5. Plano de Anomalía Residual integrado del Acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).



Los autores, a partir de la concentración de anomalías negativas ubicadas en el plano de Anomalía Residual integrado (Figura 5.5), establecen que la cuenca donde se tiene el Acuífero San José de Guaymas, tiene una orientación NW-SE y está conformada por dos depresiones importantes. La primera de ellas se tiene en la porción central del acuífero con anomalías de hasta -24.479 mGals en la estación EG-014; y en la porción sur se presenta la segunda depresión, quizá la más importante en términos de profundidad, ya que en la estación EG-59 se tiene un valor de -165.531 mGals. Lo anterior, define las características de la profundidad al basamento y la configuración de éste, dentro del área de estudio de esta tesis.

Igualmente la premisa de que la porción sur es la más importante desde la perspectiva acuífera, trazaron en esta zona un total de 7 perfiles a partir del plano de Anomalía Residual integrado para ser procesados en el módulo de modelación directa 2.5 D de propio WingLink ® (Figura 5.6). Por lo tanto, es importante establecer que esta zona sur en donde se tiene la concentración de TEM's, se pudo integrar la información del subsuelo para dar mayor certidumbre a las interpretaciones y de esta forma resultó de gran utilidad comparativa para los resultados de la hidrogeoquímica de este trabajo de tesis.

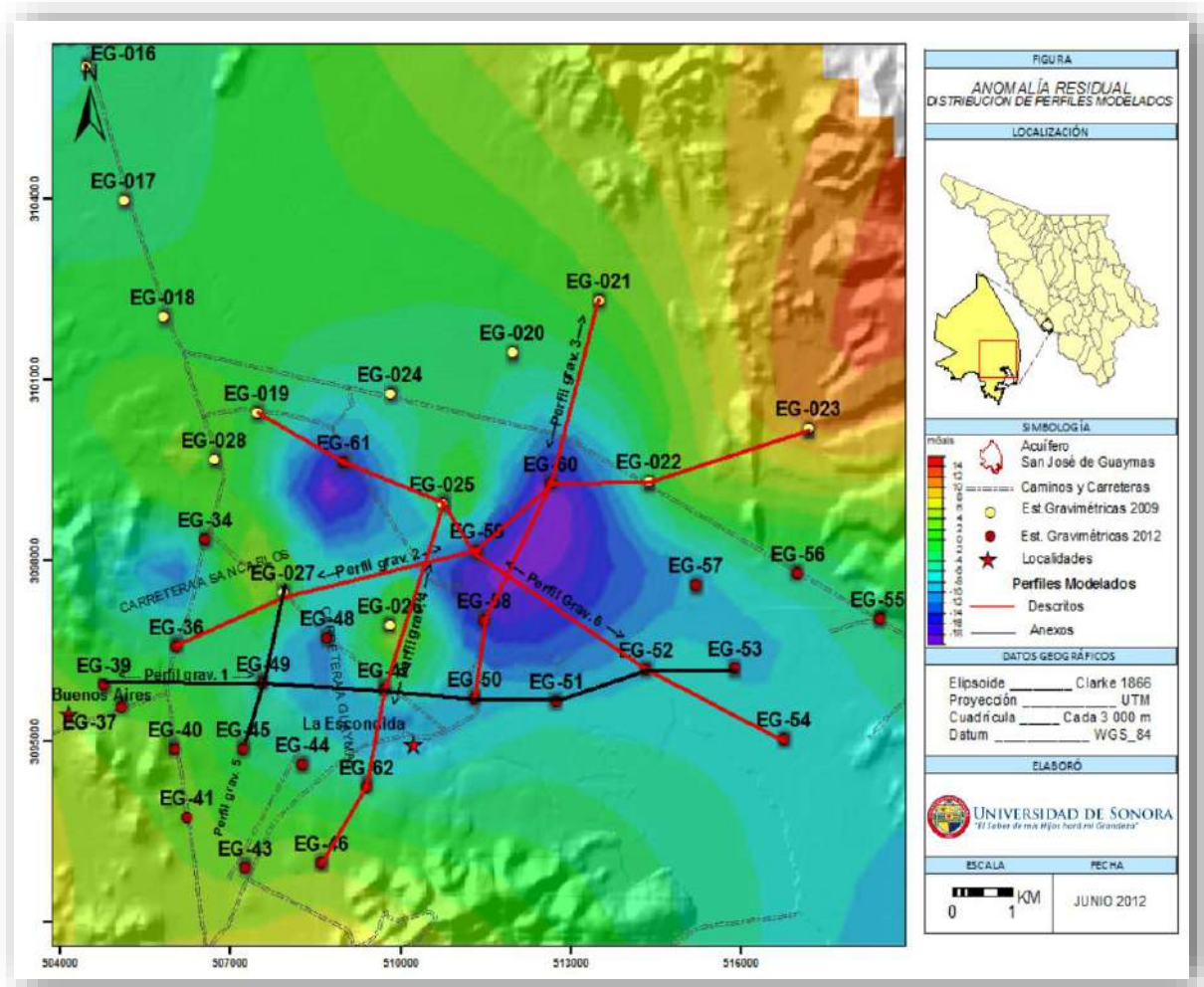


Figura 5.6. Plano de Anomalía Residual donde se muestra la distribución de los perfiles modelados (CEA, 2012).

Estos modelos gravimétricos establecen que los sedimentos que rellenan la cuenca presentan un basamento constituido por 3 litologías: 1) un basamento granodiorítico mesozoico cubierto discordantemente por, 2) una secuencia volcánica y volcanoclástica dominada por rocas félsicas del Mioceno Medio, y 3) una secuencia basáltica del Mioceno Tardío que se encuentra sobre yaciendo a la secuencia anterior y que se tiene aflorando en gran parte de la porción oriental de la cuenca. Las densidades utilizadas para este proceso se muestran en la tabla 5.2.



Tabla 5.2. Densidades utilizadas en la modelación de los perfiles

LITOLÓGÍAS	DENSIDAD
Sedimentos	1.95 gr/cm ³
Secuencia basáltica	2.90 gr/cm ³
Secuencia volcánica félsica	2.61 gr/cm ³
Granodiorita	2.73 gr/cm ³

5.3. INTERPRETACIÓN Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.

5.3.1 Perfiles de Resistividad

A partir de los resultados obtenidos con el levantamiento de los 45 TEM, tanto en la campaña del 2008 realizada por el ITSON (Sjg-01 – Sjg-29) y la realizada en el 2012 por el CEA (GU-01 – GU-16) dentro del acuífero San José de Guaymas (Figura 5.7), se modelaron varios perfiles de resistividad con el objetivo de identificar y determinar la distribución espacial y geométrica de las diferentes unidades resistivas interpretadas.

Las características de resistividad en el subsuelo del área estudiada permiten delimitar un total de 6 unidades resistivas, una de las cuales presenta rangos de variación internos, provocados seguramente por la influencia de agua de mala calidad, por lo que ésta se dividió en dos sub-unidades (Tabla 5.3). Es importante establecer que las interpretaciones desarrolladas en el presente trabajo se sustentan en el conocimiento previo de las condiciones hidrogeológicas locales y de la región, sin embargo, la correlación granulométrica de los rangos de resistividad de cada unidad resistiva, puede eventualmente estar sujeta a verificación mediante exploración directa. Sin embargo, para los fines de diferenciación de resistividades del agua de la formación, los perfiles son de gran utilidad, al poder diferenciar los sedimentos o rocas que almacenan agua dulce y agua salina, los cuales mostrarán una gama de bajos resistivos en la zona costera.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

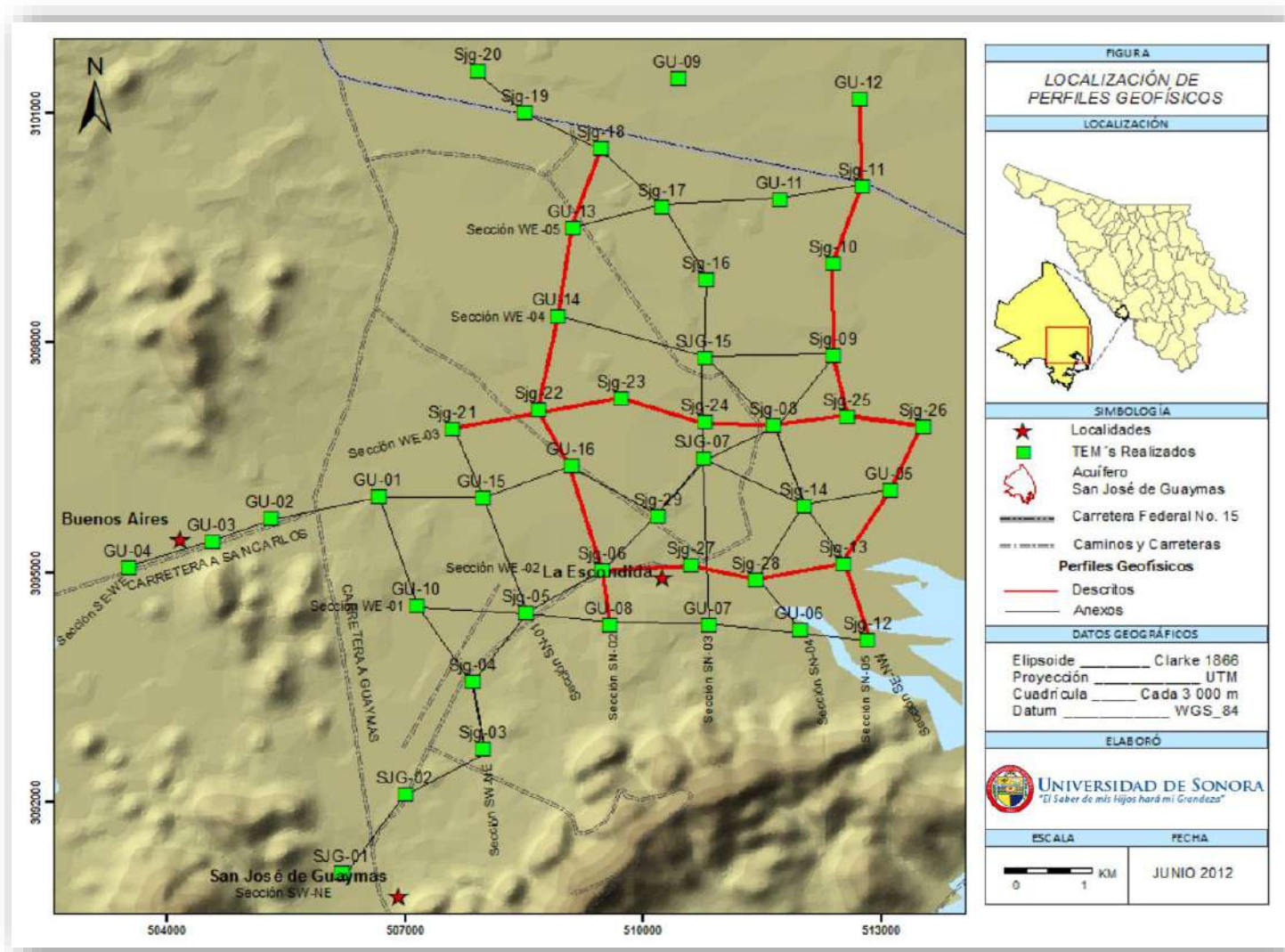








Figura 5.7. Localización de perfiles de resistividad (ITSON, 2008 y CEA, 2012).



Lo que el desarrollo e interpretación de los TEM ofrece como resultado cuantitativo únicamente son valores de resistividad del subsuelo, y no es posible obtener valores de otros parámetros tales como porosidad de la roca, o contenido mineralógico; aun así, se pueden realizar inferencias y modelos de ciertas condiciones geológicas y calidad de agua.

Tabla 5.3. Unidades resistivas interpretadas dentro del área estudiada.

TABLA GEOELÉCTRICA SAN JOSÉ DE GUAYMAS		
UNIDAD	INTERVALO RESISTIVO	CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS
U1	Variable	Relleno superficial, suelo y materiales no saturados
U2	 1 a 2	Zona interfase y/o Arcilla Azul
U3	 2 a 10	Arcilla-Arena arcillosa
U4	(a)  10 a 25	Gravas arenosa
	(b)  5 a 12	Gravas arenosa saturada con agua salobre
U5	 25 a 45	Gravas y Boleos
U6	 > 45	Material Consolidado-Rocoso
Nota: Se presenta una asociación litológica general que considera la relación típica entre la resistividad, y los materiales granulares. Puede presentarse excepciones.		

La unidad resistiva **U1** es la más superficial en la mayoría de los perfiles, presentándose con un espesor muy reducido y con rangos de resistividad muy variables que van desde menores a los 5 Ohm/m hasta mayores de 200 Ohm/m.

La **unidad U2** presenta un rango entre 1 y 2 Ohm/m, y en el presente trabajo se interpreta como una zona de interfase con elevaciones menores a los 120 msnm; mientras que esta unidad a profundidades mayores se considera como una "arcilla verde-azul" que se reporta en la literatura hidrogeológica del acuífero, y la cual, en al menos uno de los pozos perforados, es identificada a los 150 m de profundidad. La **unidad resistiva U3** presenta una resistividad entre 2 y 10 Ohm/m, interpretándose como un paquete dominado por sedimentos del tamaño de la arcilla a arena fina

Para el caso de la **unidad U4**, la cual se interpreta con valores entre 5 y 25 Ohm/m, y que de manera general se asocia a sedimentos arenosos-gravosos, tiene la particularidad de que fue dividida en dos sub-unidades. La sub-unidad U4a se propone con un rango de resistividad entre 10 y 25 ohm/m, la cual es representativa de la granulometría antes



mencionada; mientras que la sub-unidad U4b, con valores resistivos entre 5 y 12 Ohm/m, representa estas mismas arenas y gravas pero con una saturación de agua salobre.

La **unidad U5** se presenta en la porción basal de la mayoría de los perfiles modelados como una capa con resistividad variable desde 25 hasta 45 Ohm/m, proponiéndose que se trata de gravas y boleos de gran tamaño. Eventualmente esta unidad se tiene a manera de lentes dentro de la unidad U4a, los cuales son interpretados como paleocauces sepultados. Finalmente la **unidad U6** corresponde a resistividades mayores de 45 Ohm/m que localmente aparecen en algunos perfiles, y representan la secuencia rocosa del basamento.

Es importante mencionar que los rangos de valores de resistividad utilizados en este apartado para definir las diferentes unidades resistivas, no necesariamente son fijos, ya que al momento de la interpretación geoelectrica, y de acuerdo a su distribución en los perfiles, éstos pueden llegar a tener pequeñas variaciones. Asimismo, los contactos entre diferentes materiales se identifican en la zona de inflexión, entre los valores más altos y más bajos, o a la profundidad donde los valores en el sondeo se repiten; estos cambios o particularidades de resistividad, marcan cambios en las condiciones de granulometría o eventualmente litologías en el subsuelo.

Para propósitos de presentación del trabajo de tesis, en el presente apartado se describen los cuatro perfiles de resistividad más representativos del subsuelo del área estudiada.

Perfil de Resistividad WE-02

Este perfil fue construido y reinterpretado a partir del análisis de 4 TEM desarrollados en la campaña 2008 (SJG-06, SJG-27, SJG-28 y SJG-13); tiene una orientación general oeste-este y una longitud aproximada de 4 km, con una separación de TEM entre 1 y 0.8 km (Figura 5.8). Se localiza hacia el sur del poblado de San José de Guaymas, y entre los TEM SJG-06 y SJG-27 se tiene el poblado La Escondida.

La unidad U1 representa localmente en la porción central más superficial de este perfil (TEM SJG-27), con un espesor menor a los 10 m y con resistividades entre 23 y 24 Ohm/m.



El subsuelo en la porción más oriental del perfil (TEM SJG-28 y SJG-13) está dominado por tres unidades. Los primeros 100 m de profundidad están representados por resistividades bajas, donde la unidad U2 (1-2 Ohm/m) se encuentra casi englobada por los sedimentos areno-arcillosos de la unidad U3 (3-9 Ohm/m). En el trabajo realizado por la CEA en 2012, la unidad U2 es considerada como la zona de interfase, la cual se tiene superficialmente en el TEM SJG-13 y a unos 10 m de profundidad en el TEM SJG-28. La parte basal de esta porción del perfil está dominada por la sub-unidad U4b, en donde los valores de resistividad entre 5 y 11 Ohm/m, son interpretados como sedimentos gruesos saturados con agua salobre, representando la zona de interfase en este acuífero costero. Es importante mencionar que esta última interpretación se basa en datos obtenidos de la descripción litológica de un pozo, en donde la presencia de gravas a una profundidad de 100 m, corresponde a los valores de resistividad mencionados para la sub-unidad U4b en el TEM.

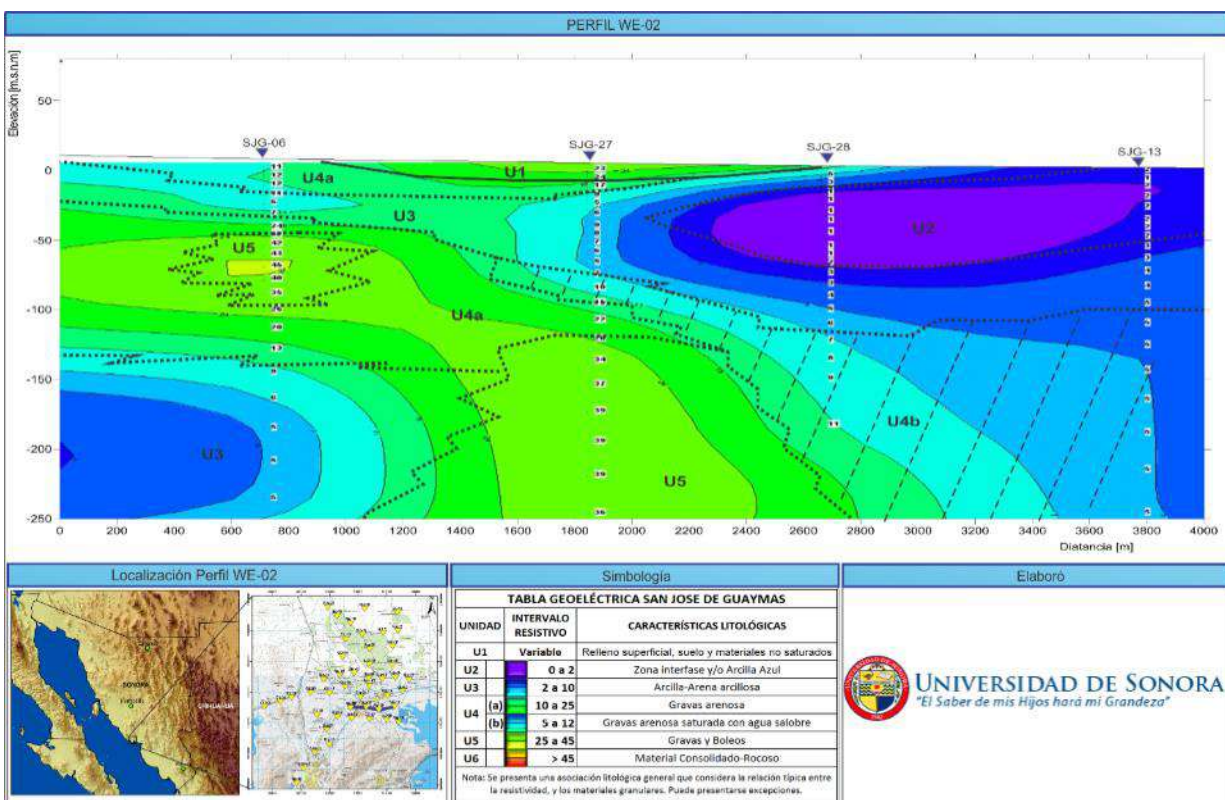


Figura 5.8. Perfil de Resistividad WE-02 (CEA, 2012).



Perfil de Resistividad SN-02

Este perfil fue construido y reinterpretado a partir del análisis de 7 TEM desarrollados en ambas campañas (GU-08, SJG-06, GU-16, SJG-22, GU-14, GU-13 y SJG-18); tiene una orientación general sur-norte y una longitud aproximada de 6.5 km (Figura 5.9). Este perfil inicia en las inmediaciones del poblado de San Ignacio y finaliza en el TEM SJG-18 al sur del poblado de Campo Nuevo.

La unidad U1 se tiene de manera continua a lo largo de la porción más superficial del perfil, con valores de resistividad entre 27 y 318 Ohm/m y un espesor máximo de apenas 10 m.

La unidad resistiva que caracteriza el relleno sedimentario en este perfil es la U4a, representando arenas y gravas cuyas resistividades están entre 10 y 25 Ohm/m, identificada en todos los TEM, principalmente en la porción central, y con el espesor máximo de 240 m en el TEM GU-16. La unidad resistiva U3 (3-8 Ohm/m) está dominando el subsuelo tanto en el límite sur (TEM GU-08 y SJG-06) como en límite norte (GU-13 y SJG-18) a partir de una elevación de -50 msnm. Si bien es cierto que esta porción se interpreta como una secuencia arcillosa, no descartamos que las resistividades bajas de la porción basal del TEM SJG-06, puedan corresponder a la zona de interfase.

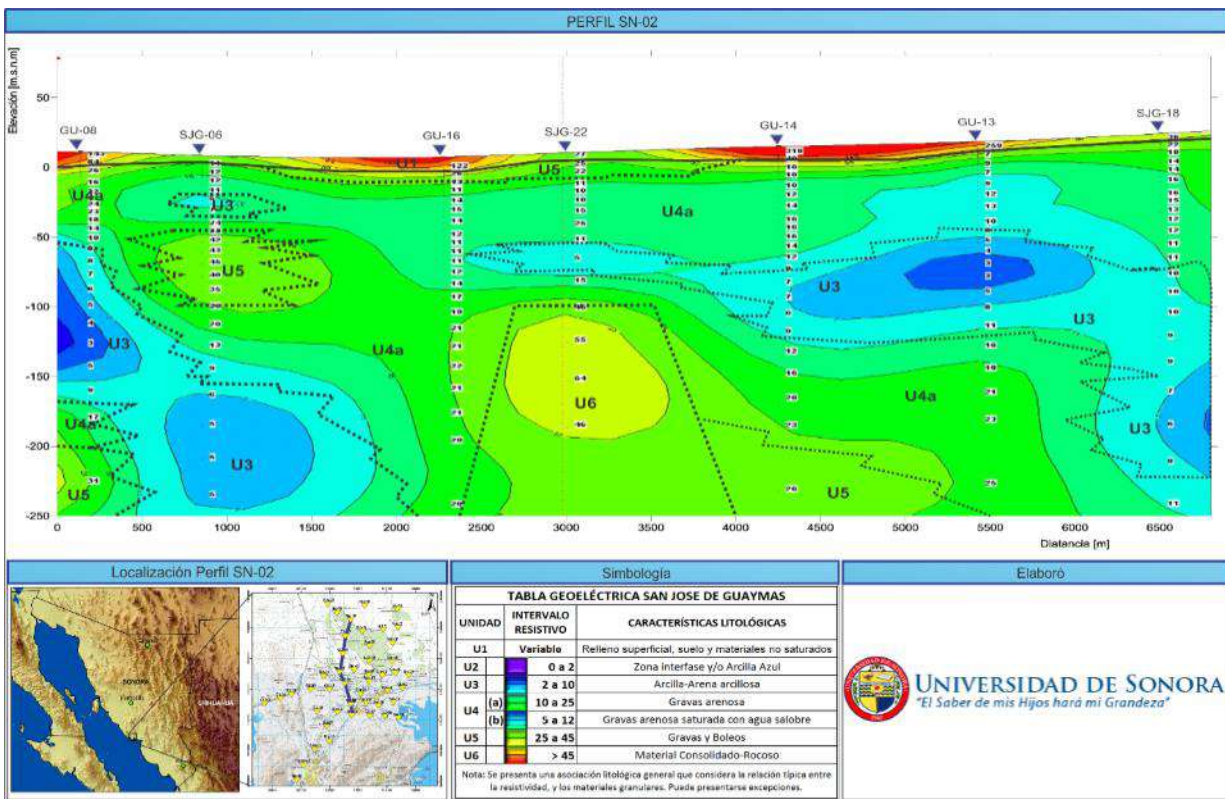


Figura 5.9. Perfil de Resistividad SN-02 (CEA, 2012).

La unidad U5 se identificó en 3 de los TEM, a partir de la elevación de -200 msnm en GU-08 y GU-14, y como un cuerpo lenticular en el TEM SJG-06, con resistividades entre 35 y 45 Ohm/m y un espesor de casi 50 m. Probablemente esta porción corresponda a un antiguo cauce. En el TEM SJG-22 se presenta un alto resistivo a partir de los -100 msnm con valores entre 46 y 64 Ohm/m, el cual probablemente corresponda a un alto estructural sepultado del basamento volcánico de la cuenca.



Perfil de Resistividad SN-05

Este perfil fue construido y reinterpretado a partir del análisis de 9 TEM desarrollados en 2008 y 2012 (SJG-12, SJG-13, GU-05, SJG-26, SJG-25, SJG-09, SJG-10, SJG-11 y GU-12); tiene una orientación general sur-norte y una longitud aproximada de 9 km hacia el límite oriental del acuífero (Figura 5.10). Este perfil inicia en la esquina suroeste del estanque acuícola que se tiene en la cabecera del Estero El Rancho, y termina en las inmediaciones del poblado de La Buenaventura.

La unidad U1 se tiene de manera continua a lo largo de la porción más superficial de los TEM's que integran la parte centro-norte (SJG-09 al GU-12), con valores de resistividad entre 18 y 153 Ohm/m y un espesor máximo de apenas 10 m.

El subsuelo de la porción centro-sur de este perfil (SJG-12 al SJG-09) está dominado por sedimentos que presenta resistividades bajas. La unidad U2 puede ser considerada como la más superficial, la cual alcanza un espesor máximo de casi 100 m en el TEM SJG-12, y uno mínimo de 25 m en el TEM SJG-25. Los valores resistivos tan bajos de esta capa que se acuña hacia el norte es considerada como la zona de interfase. Si bien es cierto que los valores resistivos tan bajos están presentes a profundidad en todo el TEM SJG-12, en este trabajo se considera que dichos valores por debajo de una elevación de -100 msnm, corresponden a la presencia de una arcilla (arcilla verde-azul). La unidad U4b se interpreta en la porción basal de los TEM de esta porción del perfil, con valores resistivos entre 5 y 10 Ohm/m, la cual representa la zona de interfase.

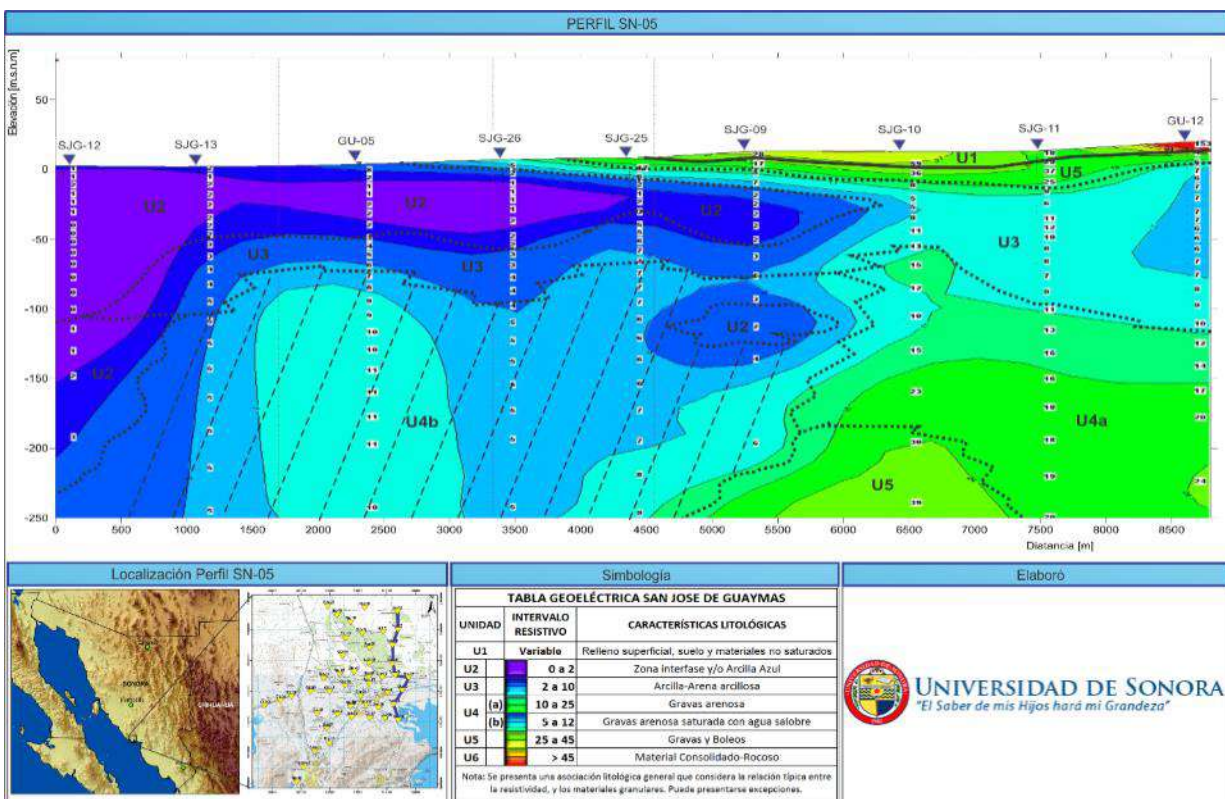


Figura 5.10. Perfil de Resistividad SN-05 (CEA, 2012).

El subsuelo de la porción norte del perfil (SJG-10 a GU-12) no se presenta influenciado por la zona de interfase, dominando la unidad U4a en los tres TEM con valores de resistividad entre 10 y 24 Ohm/m. También la unidad U3 está presente, principalmente en el TEM GU-12 donde alcanza un espesor de 120 m y resistividades entre 6 y 10 Ohm/m, y un espesor mínimo de 50 m en el TEM SJG-10. La unidad U5 se tiene en la porción basal del TEM SJG-10, con casi 70 m de espesor y resistividades entre 30 y 39 Ohm/m.

Perfil de Resistividad WE-03

Este perfil fue construido y reinterpretado a partir del análisis de 7 TEM desarrollados en la campaña 2008 (SJG-21, SJG-22, SJG-23, SJG-24, SJG-08, SJG-25, SJG-26); tiene una orientación general oeste-este y una longitud aproximada de 7 km en la porción central del área (Figura 5.11). Este perfil inicia en las cercanías del poblado La Colorada, y termina al noroeste del poblado La Nopalera.

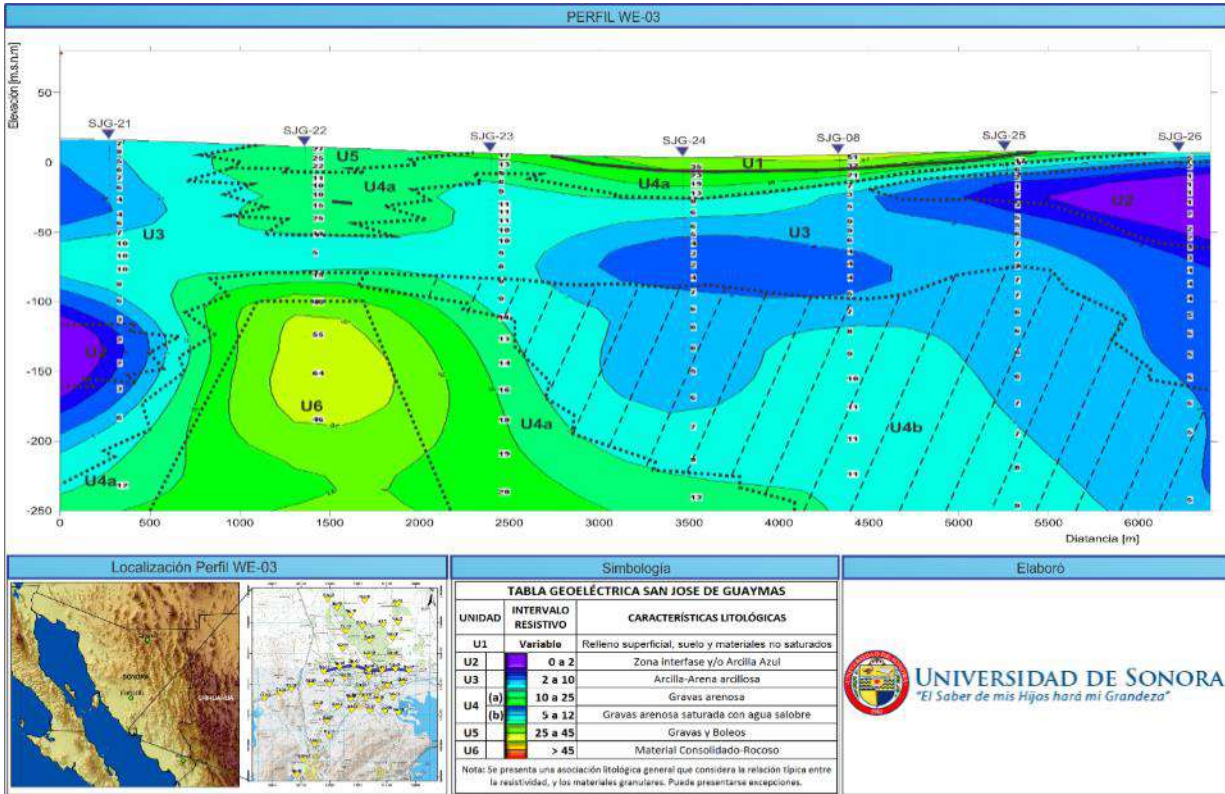


Figura 5.11. Perfil de Resistividad WE-03 (CEA, 2012).

La unidad U1 sólo se presenta en la porción centro-este del perfil (SJG-24 al SJG-25) con unos 10 m de espesor máximo y resistividades entre 32 y 51 Ohm/m. La unidad U3 está ampliamente distribuida en todos los TEM's del perfil, con resistividades entre 4 y 10 Ohm/m. La unidad U2 se tiene en ambos límites del perfil; por un lado, en los TEM SJG-25 y SJG-26 se presenta con resistividades entre 1 y 2 Ohm/m, interpretándose, por estar sobre los -100 msnm, como parte de la zona de interfase proveniente del Estero El Rancho; y por otra, en el TEM SJG-21, con valores resistivos de 2 Ohm/m y a una elevación menor a los -100 msnm, se interpreta como la presencia de una zona arcillosa (arcilla verde-azul).

La unidad U4a se presenta de manera somera entre los TEM SJG-22 y SJG-23 con resistividades entre 10 y 26 Ohm/m, alcanzando su máximo espesor de 50 m en el primero; aunque en el TEM SJG-23 también se interpreta en la porción basal.

La unidad U5 aparece someramente en el TEM SJG-22 (20 m de espesor), representando seguramente depósitos sub-superficiales de un cauce actual. En este último TEM, también a profundidad se tienen resistividades altas que identifican a la unidad U6 del



basamento rocoso de la cuenca. Finalmente es importante mencionar que la zona de interfase, aquí representada por la unidad U4b, presenta una forma de cuña que desaparece hacia el oeste del área, la cual no se tiene en el subsuelo del TEM SJG-22.

5.3.2 Mapas de Resistividad y Modelo Geofísico

Tomando como base los resultados de los trabajos geofísicos de resistividad citados para el acuífero de San José de Guaymas, también se utilizaron los mapas de resistividad a diferentes elevaciones del subsuelo (Figura 5.12), con el propósito de identificar la distribución espacial en planta de las diferentes unidades resistivas, y mostrar de manera gráfica las interpretaciones realizadas para el subsuelo del acuífero, para así compararlas con los perfiles hidrogeoquímicos obtenidos con el monitoreo de agua de pozos.

Las resistividades medias a altas (colores verdes a naranja) en la porción más superficial (20 msnm) establecen la presencia de una zona de relleno aluvial muy reciente a lo largo de toda el área del acuífero. Estos mismos valores resistivos en una porción del subsuelo desde los 10 msnm y hasta los -25 msnm, determinan la presencia de un acuífero libre en la zona, que de manera general corresponden a los primeros 50 m de profundidad. En estos niveles, es claro como hacia la porción sureste del acuífero empieza a estar dominada por valores bajos de resistividad (colores azules), donde inclusive se muestran los efectos de la intrusión salina con resistividades muy bajas que se reducen hasta los 0 Ohm/m (colores morados).

Con un espesor de 75 m, entre las elevaciones de -50 y -125 msnm, se extiende en gran parte del subsuelo del acuífero una zona de resistividades bajas que se interpretan como sedimentos arcillosos, reduciendo su espesor hacia la porción central, donde resistividades medias permiten proponer la presencia de un paleocauce sepultado que presenta una orientación general NW-SE. Es importante hacer notar que las resistividades características de la zona de interfase dejan de aparecer a partir de una elevación de -100 msnm. Por lo que los valores similares que eventualmente aparecen en los perfiles a mayores profundidades a partir



de esta elevación, son considerados como una arcilla depositada bajo la influencia de la actividad marina (arcilla verde-azul).

Las resistividades por debajo del plano a una elevación -125 msnm se incrementan, por lo que muy probablemente se tenga dentro de esta porción un acuífero confinado, más o menos a una profundidad de 150 m, el cual presenta una zona de agua de mezcla donde las resistividades son menores a medida que se acerca a la posición del estero El Rancho. No se descarta que algunas de estas resistividades altas (colores naranjas) puedan corresponder a bloques levantados del basamento rocoso.

Los perfiles de resistividad fueron integrados en un modelo tridimensional para este trabajo de tesis, con el objetivo de mostrar con mayor claridad gráfica, la expresión y observación de los resultados (Figura 5.13). El modelo geofísico se compone de seis grandes capas resistivas, lo que ofrece la posibilidad de inferir las condiciones geológicas a partir del conocimiento de los valores de resistividad en el subsuelo.

En el modelo podemos observar que en la parte NW se tiene la presencia de gravas arenosas, así como arcillas, las cuales se representan por valores de resistividad que van de 0 Ohm/m a 25 Ohm/m (tonalidades verdes), lo más evidente en este modelo es en la parte SE, la cual se muestra claramente la zona de interfase presente en el área de estudio, la cual tiene su entrada por el Estero El Rancho, cubriendo hasta la parte central de la zona, esta zona de interfase tiene un espesor aproximado de 50 m, pasando estos 50 m podemos encontrar las arcillas verde-azul.

Cabe mencionar que tanto la zona de interfase como el paleocauce se muestran claramente con valores bajos de resistividad (tonalidades azules) tal como se muestra en la figura 5.13.

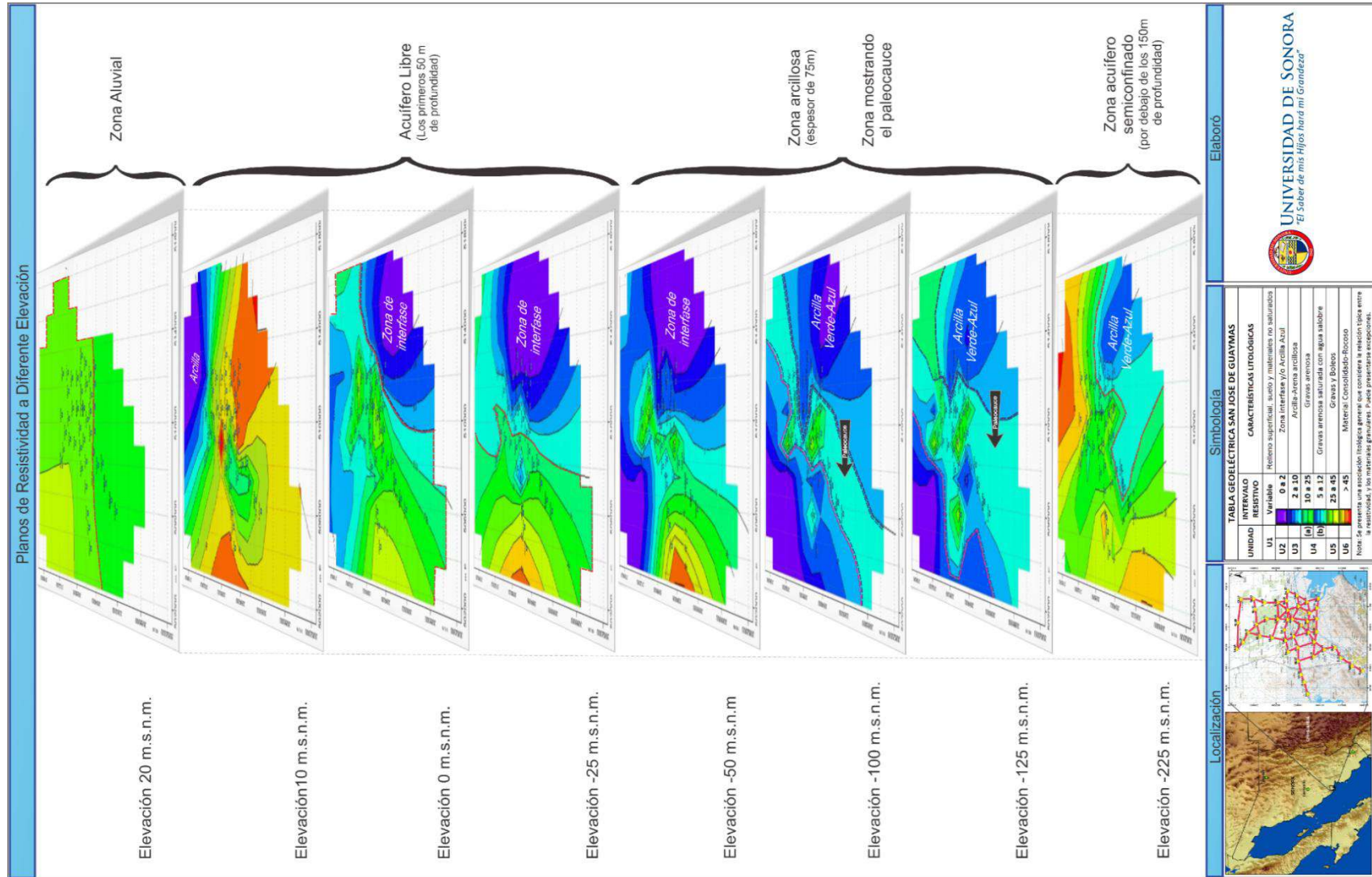


Figura 5.12. Resistividad a diferente elevación en la zona sur del acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

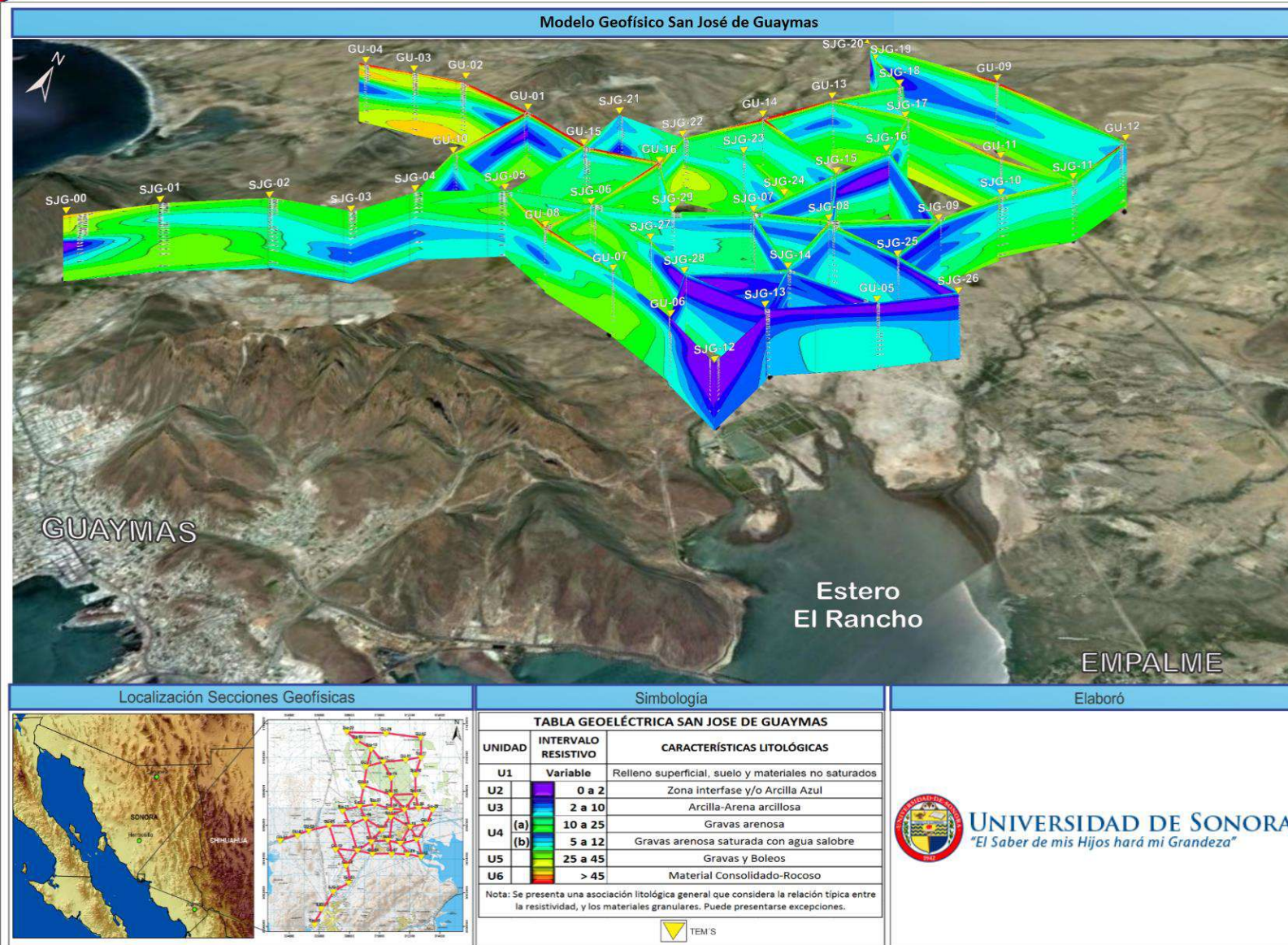


Figura 5.13. Modelo geofísico (CEA, 2012).



5.3.4 Modelos de penetración de la zona de interfase

Dependiendo del propósito del estudio a realizarse, en ocasiones se busca encontrar la cuña de la intrusión marina hacia continente, mientras que en otros se busca delimitar la posición de la interfase, entendiéndose por este concepto, como la franja costera donde se forma una zona de mezcla de agua marina que ha penetrado y alcanzado el agua subterránea dulce continental para formar agua subterránea salobre. En la mayoría de los casos han existido perforaciones en las cuales se ha observado la evolución de la calidad del agua dulce hacia su degradación incrementando la presencia de sales, y en tales pozos se ha podido realizar mediciones para **obtener parámetros físico químicos con los cuales se correlaciona la información geofísica.**

En este trabajo, el objetivo principal se centra en determinar la geometría de la intrusión marina, e identificar los espesores donde la lámina de la misma ha tenido mayor desarrollo. Sin embargo, para el caso de San José de Guaymas, una vez que se analizó la información resistiva del subsuelo, se generaron las unidades geoelectricas y se integraron a los resultados de la geoquímica del agua subterránea, se estableció que en este acuífero no se tiene una intrusión salina como tal, y se propone que la zona de agua subterránea de mala calidad y una muy baja resistividad, sea considerada como una zona de interfase con una zona somera más salina y otra salobre más profunda. A partir de tomar como base la distribución espacial de los TEM en el área, se identificó que esta zona de interfase tiene una extensión lateral en el subsuelo de aproximadamente 6 km (Figura 5.14).

Una vez analizados los diferentes perfiles del subsuelo y la distribución de la zona de interfase, se establece que ésta se despliega de manera perpendicular a la línea de costa marcada por el estero El Rancho, con una dirección preferencial hacia el NNW. Se propone que el origen de esta zona está marcado por una interacción estática natural del agua dulce y el agua salada en el subsuelo, principalmente debido a las condiciones de aguas tranquilas y de baja energía en el Estero el Rancho; además, se considera que la porción más salobre de esta zona de interfase que se tiene de manera somera en el acuífero, es respuesta a eventos extraordinarios que alteran las condiciones de energía superficial del agua salada en el estero y logra penetrar hacia el acuífero.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora, con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

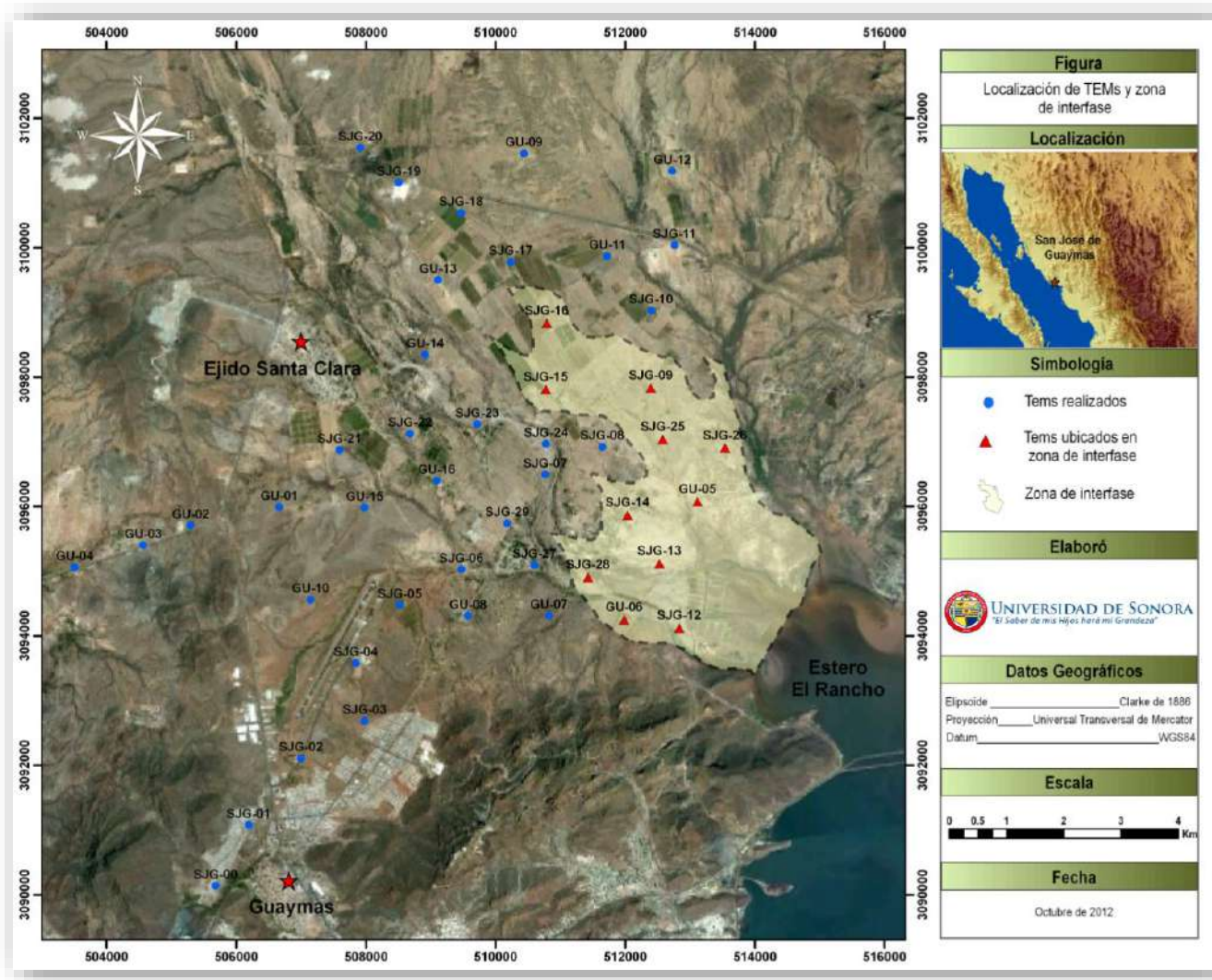


Figura 5.14. Localización de TEM realizados en el área de estudio y delimitación de zona de intrusión salina (CEA, 2012).



6. HIDROGEOQUÍMICA Y MUESTREO DE AGUAS PARA ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICOS

La Hidrogeoquímica estudia las propiedades químicas del agua superficial y subterránea, y su relación con la geología, analizando los iones disueltos en agua y los procesos de interacción agua-sólido. El agua en su movimiento a través del subsuelo entra en un contacto prolongado con los minerales que conforman los estratos y estos minerales en mayor o menor medida presentan cierto grado de solubilidad, de modo que el agua incrementa su contenido mineral hasta que logra alcanzar el equilibrio de las sustancias en solución.

El muestreo realizado en el acuífero San José de Guaymas se llevó a cabo con la finalidad de complementar los estudios realizados por el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) en el 2008 y el realizado por Investigación y Desarrollo de Acuíferos y Ambiente (IDEAS) en 2009, ampliando de tal manera el conocimiento hidrogeoquímico en aquellas zonas donde no se contaba con información para obtener mejores resultados para esta tesis.

6.1 MUESTREO HIDROGEOQUÍMICO

La distribución del muestreo de aguas subterráneas se determinó en base a las zonas de mayor interés para este trabajo de tesis, a partir de las anteriores campañas de muestreo realizadas por el ITSON e IDEAS. En el área de estudio se obtuvieron 5 muestras de agua subterránea en pozos activos, las cuales se encuentran distribuidas de manera representativa en el acuífero San José de Guaymas (Figura 6.1), donde se requería información complementaria para la interpretación hidrogeoquímica.

Las muestras se enviaron para su análisis al laboratorio Analítica del Noroeste S. A. de C.V. en la ciudad de Hermosillo, Sonora, donde se realizaron los análisis químicos correspondientes. Las determinaciones incluyeron iones mayoritarios, nitratos, dureza total, alcalinidad total, bromo, fluoruros, temperatura, conductividad eléctrica y pH.

Las muestras fueron tomadas de la descarga del flujo de los pozos, en caso que el aprovechamiento no tuviese equipo de bombeo, se utilizó una botella muestreadora Bayler (previamente lavada con agua desionizada) atada a una cuerda.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



En cada sitio de muestreo se utilizaron 2 envases: uno de 1 galón (3.78 lts) y uno de 1 litro. Al recipiente de 1 litro se agregaron 3 mL de ácido nítrico (HNO_3) como preservador de metales.

Los envases utilizados fueron previamente lavados con agua acidulada, y etiquetados con clave de rastreabilidad, fecha, hora de toma de muestra, tipo de preservador adicionado, tipo de análisis, nombre del muestreador y condiciones ambientales. Para evitar pérdidas, el cierre de las botellas se hizo aplicando papel "Parafilm" alrededor de la tapa. La preservación de las muestras fue con hielo, con el fin de mantenerlas a una temperatura de 4°C durante su transportación al laboratorio.

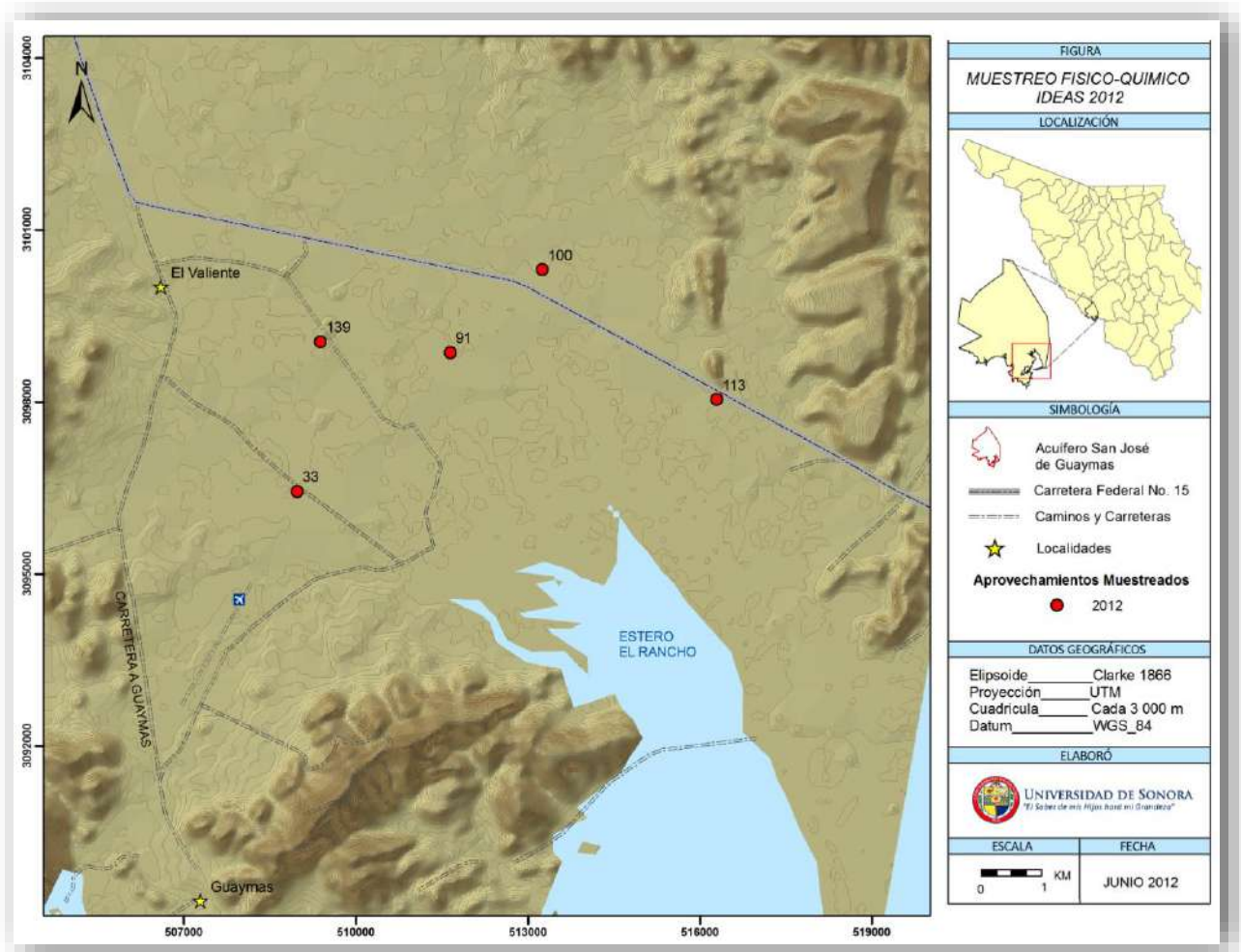


Figura 6.1. Distribución del Muestreo de aguas subterráneas para análisis físico-químico.



Proceso de toma, preservación y transporte de muestras.



Fotografía 6.1.- Toma de muestras.



Fotografía 6.2.- Adición de preservador.



Fotografía 6.3.- Etiquetado de muestras.



Fotografía 6.4.- Preservación en hielo.



Fotografía 6.5.- Medición de parámetros de Campo.



Los datos registrados en cada aprovechamiento incluyeron: fecha, hora, responsable de la toma de la muestra, clave de rastreabilidad, temperatura ambiente, coordenadas UTM (utilizando un equipo de geoposicionamiento) y parámetros fisicoquímicos de Conductividad Eléctrica (CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$), Sólidos Totales Disueltos (STD), Salinidad, pH (Potencial de hidrógeno) y Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) de la muestra. Para obtener dichos parámetros se utilizó un equipo multiparamétrico Hanna® (Fotografía 6.5), el cual se calibró previo a la medición de los diversos parámetros. Los resultados de los parámetros medidos en campo se muestran en la tabla 6.1 y los resultados de laboratorio se encuentran en el Anexo I.

Tabla 6.1. Parámetros Físico-químicos obtenidos en campo.

ID	Clave de rastreabilidad	X	Y	pH	C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (ppm)	TEMP ($^{\circ}\text{C}$)
113	P-113	516291.008	3098039.000	7.62	1071	482	27.57
100	P-100	513245.709	3100302.435	6.71	985	407	29.75
91	P-91	511642.996	3098860.485	6.39	9428	4245	28.76
33	P-33	508972.142	3096438.012	6.88	4640	2086	27.88
139	P-139	509378.865	3099045.382	6.51	934	421	29.76

La clave de rastreabilidad se asignó respetando la clave original que se le dio al aprovechamiento en otros estudios, con el fin de evitar duplicidades que provoquen confusiones en un futuro.

6.2 MUESTREO ISOTÓPICO.

Con la finalidad de caracterizar el Acuífero San José de Guaymas, se realizó la toma de 10 muestras para el análisis de isótopos estables de ^2H y ^{18}O , los cuales se utilizaron como trazadores del origen de las aguas subterráneas.

Dado que los isótopos estables no se desintegran, siempre se mantiene el mismo contenido en las aguas; dicho contenido se ve afectado por la historia del agua, la evaporación, factores geográficos, procesos de precipitación y evaporación, procesos geotermales, entre otros (Pruszkowska, 2006).



Para el caso de las aguas subterráneas, la obtención de valores de isótopos estables sirve para determinar el origen geográfico de la recarga, para tal caso, se requiere comparar el contenido isotópico del agua de recarga con el agua infiltrada, así como parámetros físico-químicos, los cuales permiten realizar una mejor interpretación de datos.

La distribución del muestreo de aguas subterráneas para análisis isotópicos se determinó a partir de obtener una mayor distribución del área estudiada, con la finalidad de que este muestreo fuese representativo y permita la mejor caracterización del acuífero, por lo que se seleccionaron y muestrearon diez aprovechamientos (norias y pozos), así como una muestra en el estero El Rancho (Figura 6.2). Las muestras se obtuvieron directamente de la descarga de flujo de los pozos, sin embargo cuando el aprovechamiento no contaba con equipo, el agua se obtuvo utilizando un botella muestreadora Bayler, la cual fue lavada previamente en cada punto. Se utilizaron dos viales de 50 mL en cada sitio, los cuales fueron rotulados con clave de aprovechamiento, hora de obtención y matriz u origen del agua (Tabla 6.2). Cada uno de los viales se llenó en su totalidad, evitando la presencia de burbujas de aire. Posteriormente se cerraron y sellaron utilizando papel Parafilm. Las muestras se preservaron con hielo manteniéndose una temperatura constante a 4°C. El análisis isotópico correspondiente se realizó en Isotech Laboratories, en Champaign, Illinois en EUA. Para el envío del conjunto de muestras se siguió el protocolo establecido por el laboratorio, a manera de evitar incidentes al momento del traslado.

Tabla 6.2. Datos de campo.

ID	POZO	X	Y	Matriz	pH	C. E. μS/cm	STD ppm
P-113	113	516291.008	3098039.000	Agua Subterránea	7.62	1071	482
P-100	100	513245.709	3100302.435	Agua Subterránea	6.71	985	407
P-91	91	511642.996	3098860.485	Agua Subterránea	6.39	9428	4245
P-33	33	508972.142	3096438.012	Agua Subterránea	6.88	4640	2086
P-139	139	509378.865	3099045.382	Agua Subterránea	6.51	934	421
SN-27	SN-27	505792.000	3101413.00	Agua Subterránea	7.40	844	382
P-135	135	506976.086	3095928.530	Agua Subterránea	6.58	5454	2454
P-45	45	506935.532	3097535.811	Agua Subterránea	6.91	1995	898
P-97	97	512543.865	3097760.460	Agua Subterránea	6.91	9162	4136
P-217	217	512340.000	3101440.000	Agua Subterránea	6.58	1670	752



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

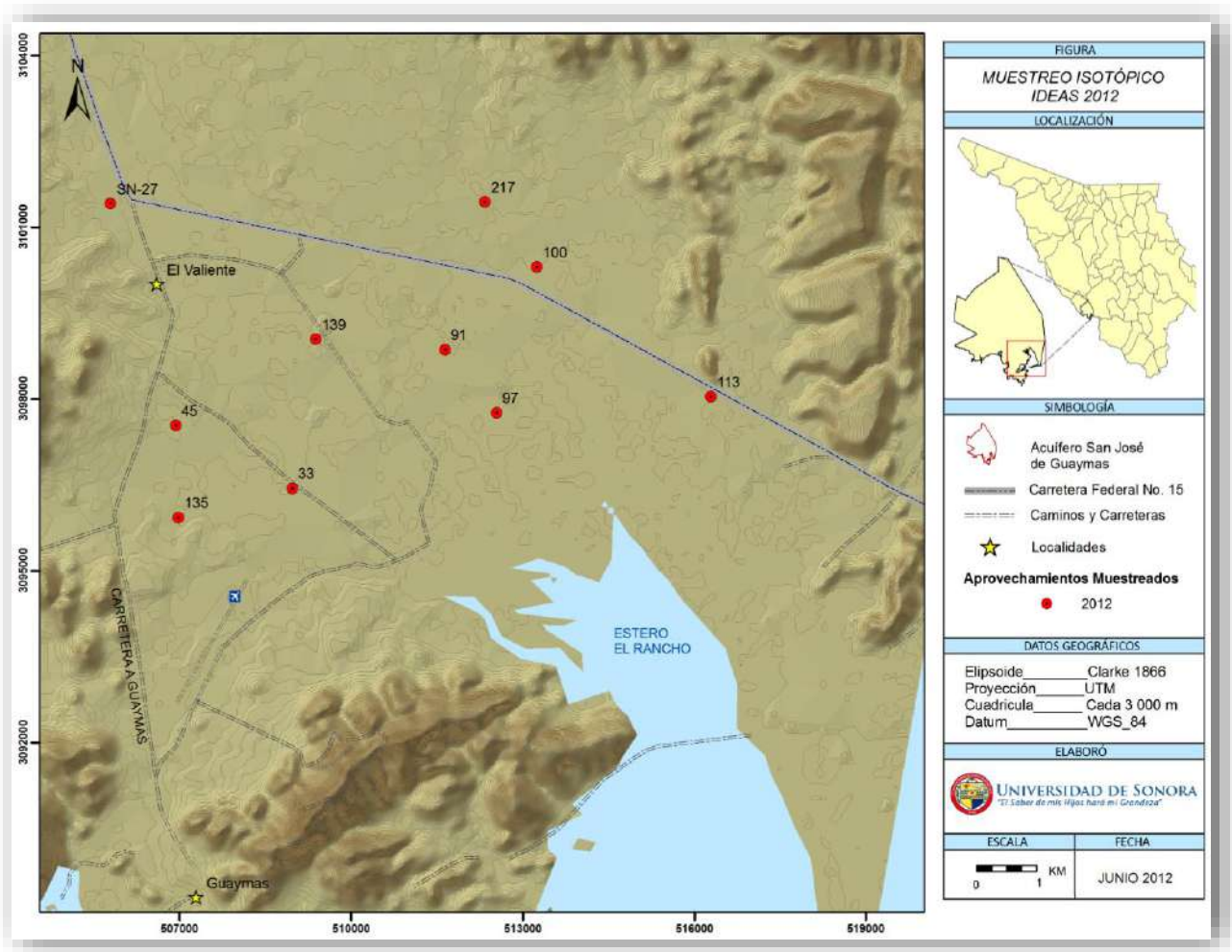


Figura 6.2. Distribución del muestreo de aguas subterráneas para determinación de Isótopos Estables.



6.3 BALANCE DE ANIONES Y CATIONES (BALANCE IÓNICO)

En un análisis químico completo debe verificarse que la suma de miliequivalentes de aniones es aproximadamente igual a la suma de miliequivalentes de cationes. Esto se debe a que normalmente el agua es eléctricamente neutra a menos que existan ciertos fenómenos que distorsionen esta propiedad.

Normalmente, el balance iónico es más adecuado implementarlo en fuentes subterráneas en vez de las fuentes superficiales, por cuanto estas últimas presentan diversos componentes químicos que tal vez no se consideran en un análisis completo.

Para poder realizar el balance iónico se deben efectuar por lo menos los siguientes parámetros de cationes y aniones (Tabla 6.3).

Tabla 6.3. Tabla de aniones y cationes para la fórmula del balance iónico.

ANIONES	CATIONES
Bicarbonatos (HCO ₃)	Sodio (Na)
Cloruros (Cl)	Calcio (Ca)
Sulfatos (SO ₄)	Magnesio (Mg)
Nitratos (NO ₃)	Potasio (K)

$$\%Balance\ Iónico = \frac{\sum(Cationes) - \sum(Aniones)}{\sum(Cationes) + \sum(Aniones)} \times 100\%$$

El porcentaje de balance iónico se define de la siguiente manera:

Estos porcentajes de balance iónico no debe exceder de 10%, se pueden aceptar valores mayores en caso que exista sospecha de factores que interfieren en la neutralidad eléctrica del agua que está siendo examinada.

Por ejemplo, aguas muy aireadas pueden sufrir este tipo de perturbaciones originando que el porcentaje no encaje dentro de los límites que se han definido (Manual de procedimientos de análisis de agua).



En la siguiente tabla (Tabla 6.4) se muestran los resultados del balance iónico para las muestras obtenidas en 2012, en ella se puede apreciar que la muestra 133 tiene un error de 27.82% sobrepasando el límite que es el 10%, las muestras restantes se encuentran por debajo de lo establecido.

Tabla 6.4. Resultados del balance iónico de 2012.

Balance iónico			
Muestra	Suma de aniones	Suma de cationes	Error %
133	10.517614	18.6280217	27.827177
100	8.43743882	9.20336613	4.34179345
91	91.8446275	99.36465	3.93287532
33	42.9520735	42.9296086	-0.02615796
139	8.96700391	10.5062413	7.90437022

En la tabla 6.5 se muestran los resultados del balance iónico realizado en el año 2009, donde se puede observar que la muestra SN-27 sobrepasa el límite del 10% mientras que los restantes se encuentran entre los valores de 8.35 y -1.87%.

Tabla 6.5. Resultados del balance iónico de 2009.

Balance Iónico			
Muestra	Suma de aniones	Suma de cationes	Error %
SN-27	43.4345123	54.6018847	11.3910473
132	24.7002442	23.7915439	-1.87392615
135	58.6305893	59.677533	0.88492968
SN-28	8.60149903	9.7634636	6.32707288
SN-30	7.61970779	8.94878612	8.02172081
2	56.080104	58.086064	1.75705288
111	14.2727911	16.5861009	7.49641234
217	11.2302349	13.2779666	8.35529186



La tabla 6.6 tiene los resultados del balance iónico obtenido en 2008, en ella se observa que todos los resultados cumplen la regla del 10%, estos datos se encuentran entre -3.62 y 7.15%.

Tabla 6.6. Resultados del balance iónico de 2008.

Muestra	Balance Iónico		
	Suma de aniones	Suma de cationes	Error %
110 CC1	5.31797154	5.73772867	3.79674849
58	4.90968272	5.2741762	3.57912932
85	10.6246956	11.965547	5.93553365
86	5.31080179	5.8378157	4.72716828
SN 1	4.50122433	5.17391802	6.95280402
56	9.44222251	10.1497571	3.61134837
75	10.4738827	11.5254668	4.78006907
74 CC2	33.9494173	32.40617	-2.32572324
92	65.096949	66.5763081	1.12350766
196	36.6281935	39.8613473	4.22692273
91	81.3472052	83.5794792	1.35349474
117	6.83654938	7.18321066	2.47266198
101	40.551346	42.8694505	2.77880898
97	98.4295949	91.5394683	-3.626973
34	47.6128345	51.6614602	4.07822159
35	37.9579597	41.4889836	4.44450566
38	25.9937293	29.7246368	6.69601028
SN3	27.3095697	28.6085335	2.32297549
37	4.34694971	5.01670159	7.15267854
45	19.118303	20.7372774	4.06210227
189	46.4535077	50.152173	3.82862094
145	55.7017002	59.6878886	3.45454768



6.4 INTEGRACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS (2008-2012).

6.4.1 Hidrogeoquímica.

6.4.1.1 Caracterización Hidrogeoquímica. Diagramas Hidroquímicos.

Para la caracterización de familias de agua se utilizaron los diagramas triangulares de Piper, la clasificación de Stiff y el diagrama de Durov. Los diagramas de Piper y Stiff son gráficos que se basan en la clasificación por balance de masas, lo que permiten zonificar la presencia regional de las diferentes familias hidrogeoquímicas, así como para acentuar las diferencias entre tipos de aguas aún del mismo acuífero.

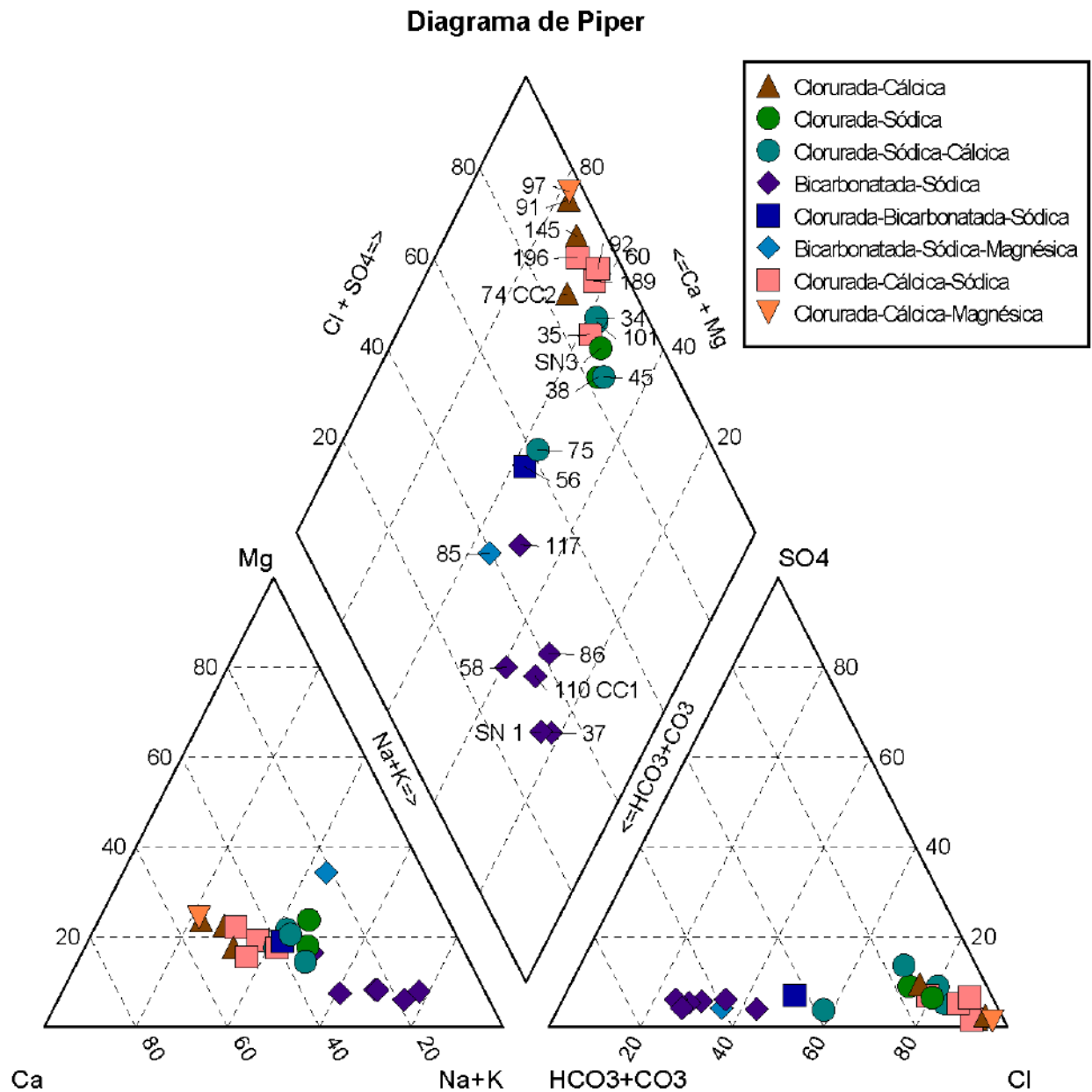
El diagrama triangular de Durov es alternativo al de Piper, y también está basado en el porcentaje de los iones mayoritarios expresados en miliequivalentes.

El diagrama de Durov consta de dos triángulos unidos por un cuadrado. Los iones más habituales son $\text{Ca}^{++}>\text{Mg}^{++}>\text{Na}^{+}>\text{HCO}_3^{-}>\text{SO}_4^{=}>\text{Cl}^{-}$ y en el sentido de las agujas del reloj, aunque puede resultar útil para representar cualquier otro elemento a juicio del hidrogeólogo (los hidrogramas y otros sistemas de representación del quimismo de las aguas). Para realización de los diagramas se utilizó el software AquaChem versión 2011.1.

En la siguiente figura 6.3 se muestra el Diagrama de Piper con las muestras obtenidas en 2008 por el ITSON, donde se graficaron los iones mayores de los 22 análisis realizados, donde se distinguen 8 grupos de familias de agua: **Bicarbonatada Sódica ($\text{HCO}_3\text{-Na}$), Bicarbonatada Sódica-Magnésica ($\text{HCO}_3\text{-Na-Mg}$), Clorurada Cálctica (Cl-Ca), Clorurada Cálctica-Sódica (Cl-Ca-Na), Clorurada Cálctica-Magnésica (Cl-Ca-Mg), Clorurada Sódica (Cl-Na), Clorurada Sódica-Cálctica (Cl-Na-Ca) y Clorurada Bicarbonatada-Sódica ($\text{Cl-HCO}_3\text{-Na}$).**



Diagramas de Piper:



La figura 6.4 muestra el diagrama de Piper con las muestras que se obtuvieron en 2009 por IDEAS, en la cual se pueden distinguir 3 familias: **Clorurada Sódica (Cl-Na)**, **Clorurada Sódica-Cálcica (Cl-Na-Ca)** y **Bicarbonatada Sódica (HCO₃-Na)**.



Diagrama de Piper

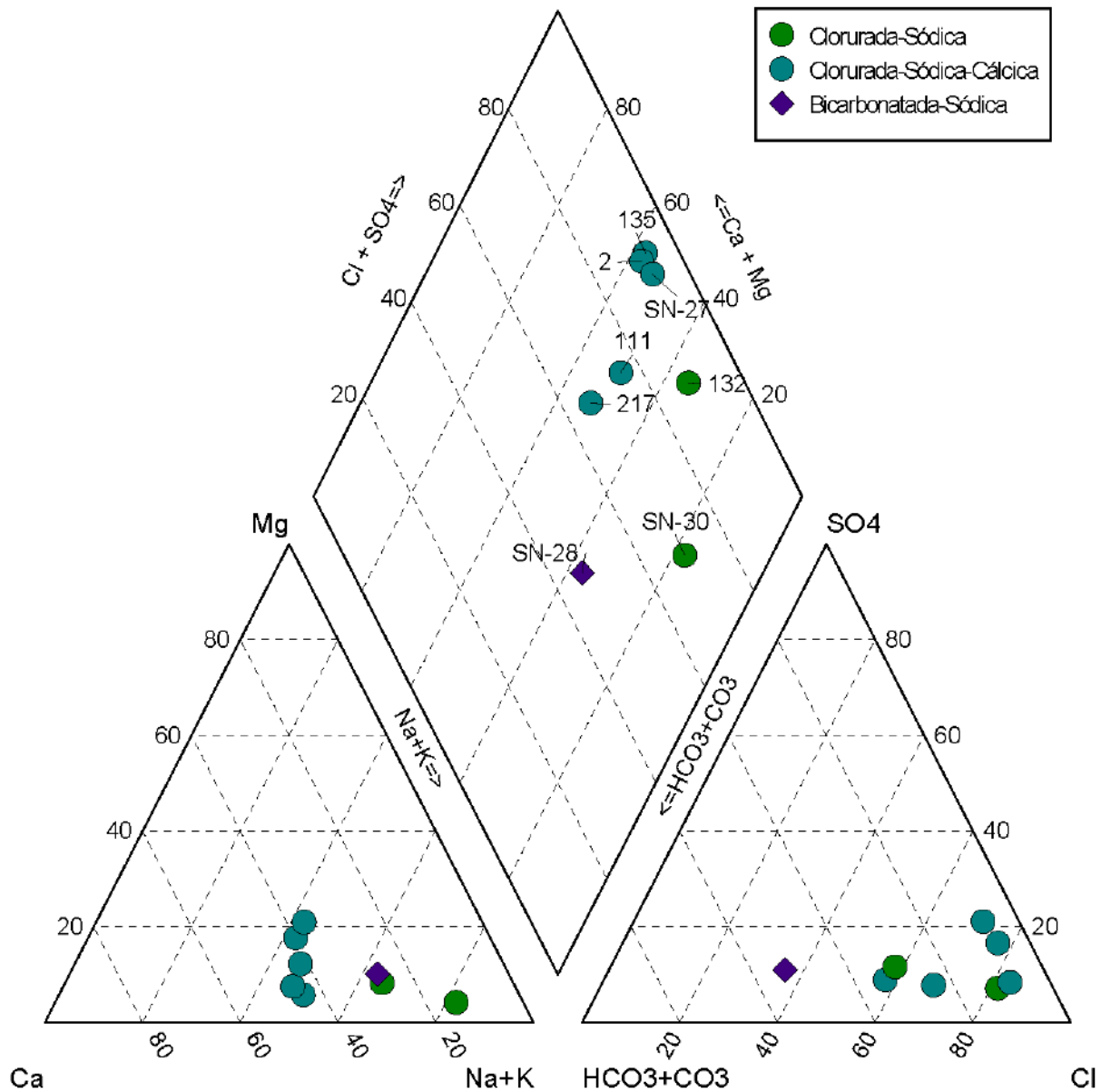


Figura 6.4. Diagrama de Piper (2009).

Para el caso de las 5 muestras obtenidas en 2012 (CEA) solo se presentan 2 tipos de familias hidroquímicas: **Clorurada Cálcica (Cl-Ca)** y **Clorurada Sódica (Cl-Na)** (Figura 6.5).



Diagrama de Piper

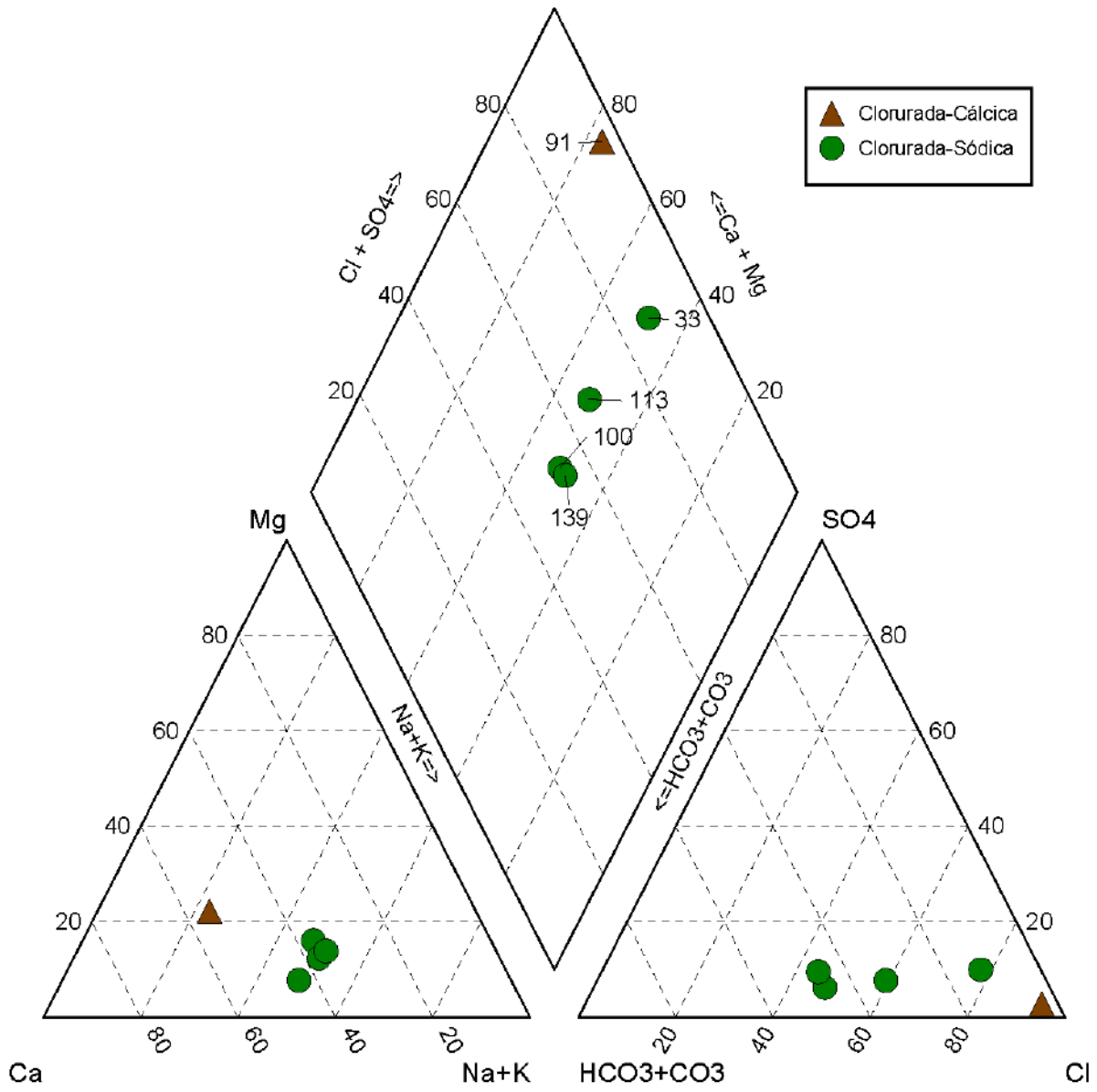


Figura 6.5. Diagrama de Piper (2012).



Diagramas de Durov:

La siguiente figura (Figura 6.6) muestra el diagrama de Durov para las muestras que se obtuvieron en el año 2008 por el ITSON. Básicamente este diagrama es parecido al diagrama de Piper ya que cuenta con 2 diagramas ternarios los cuales se proyectan, lo que hace diferente al diagrama de Durov es que también indican los valores de la conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de potencial hidrogeno (pH) de cada muestra.

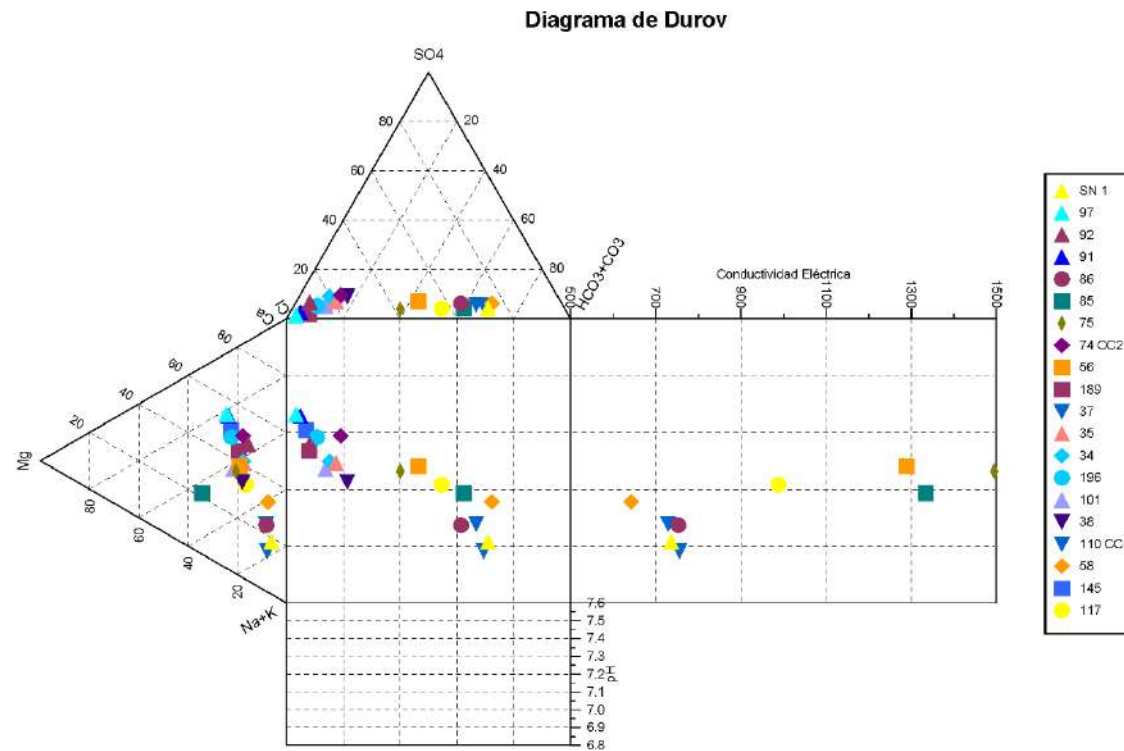


Figura 6.6. Diagrama de Durov (2008).



En el siguiente diagrama (Figura 6.7) se presentan las muestras obtenidas en el año 2009, el cual continúa con el mismo comportamiento del año 2008.

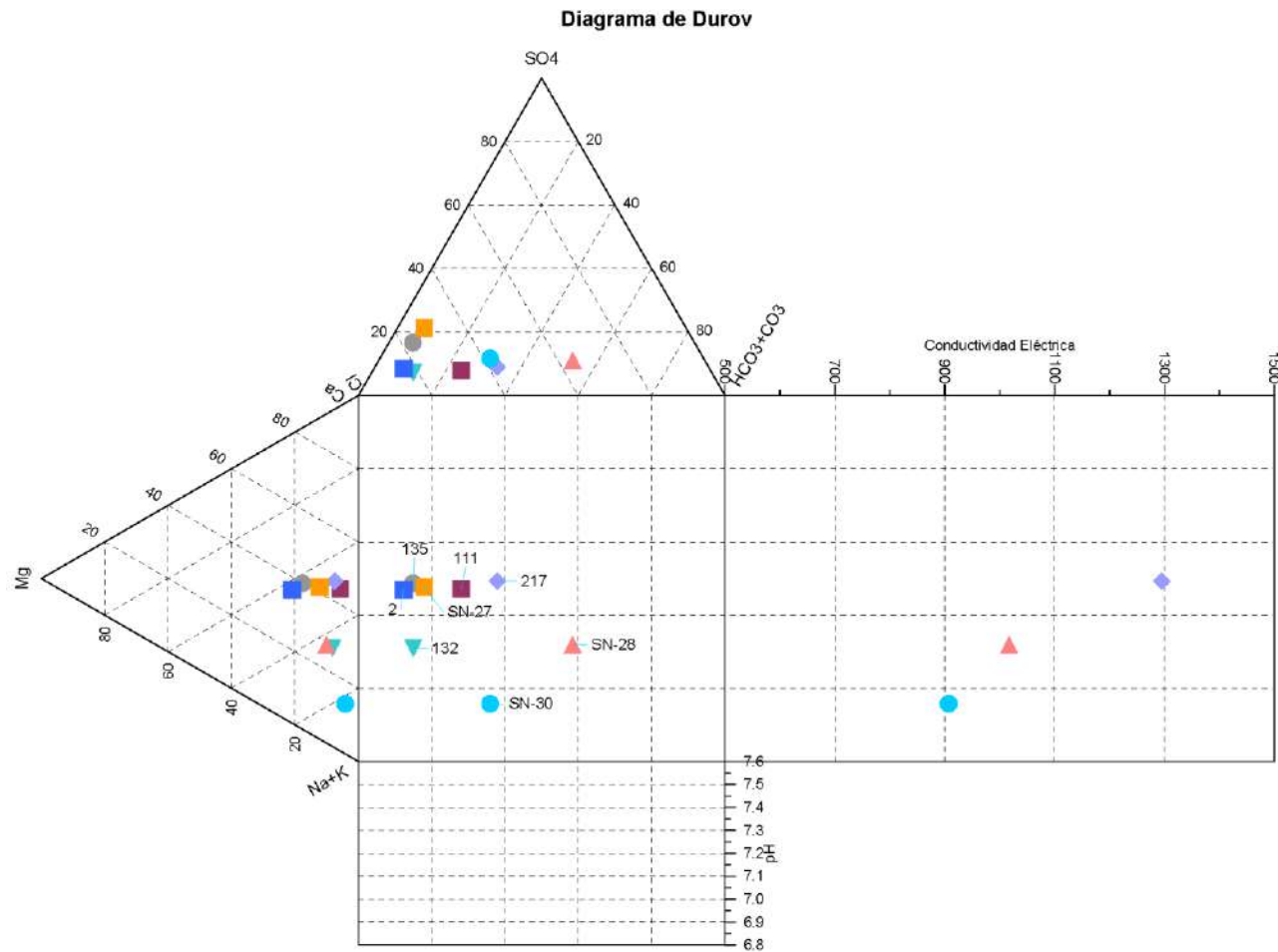


Figura 6.7. Diagrama de Durov (2009).



En la siguiente figura (Figura 6.8) se muestra el diagrama de Durov obtenido de las muestras del año 2012.

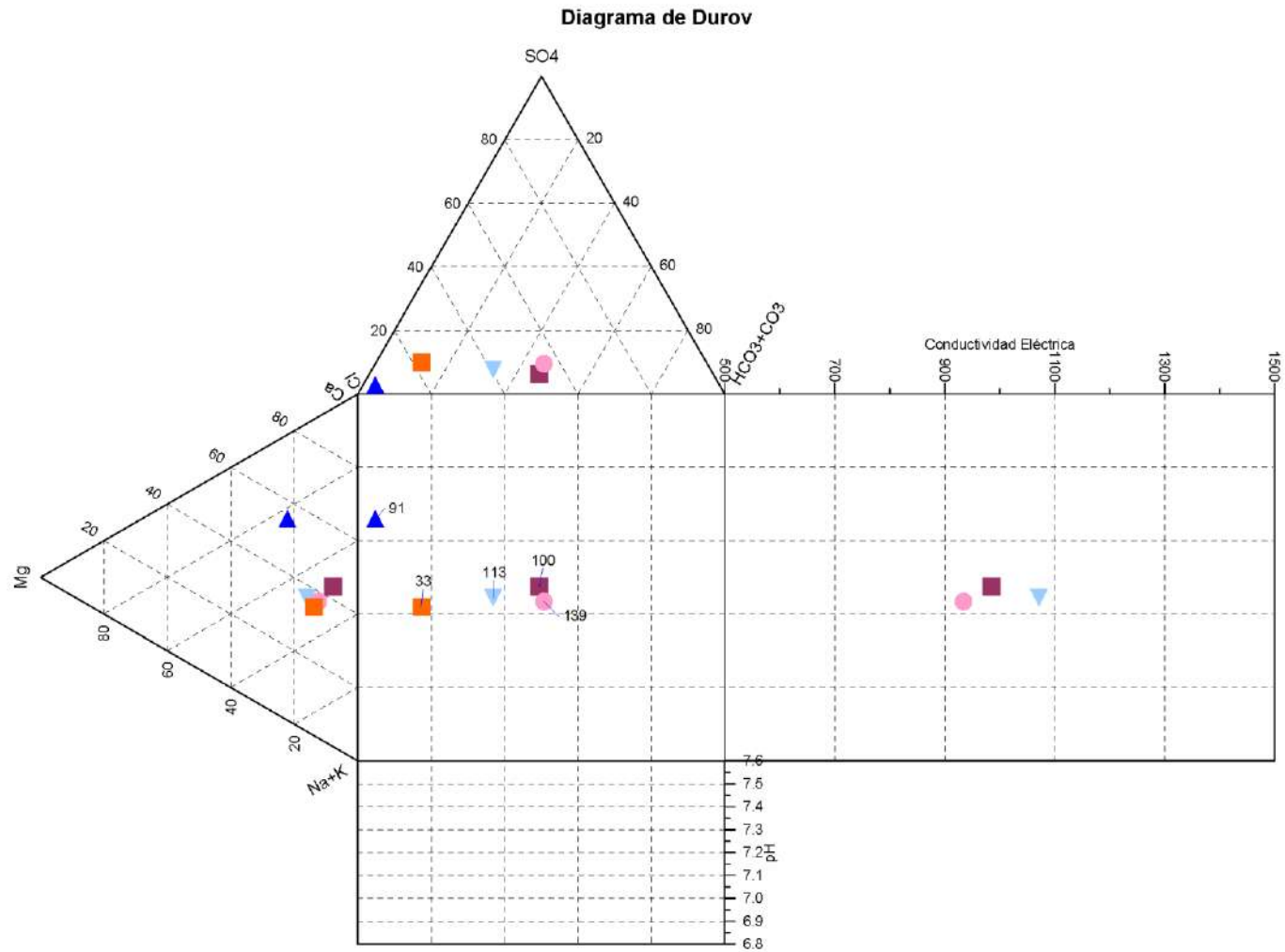


Figura 6.8. Diagrama de Durov (2012).



Diagramas de Stiff:

La siguiente figura (Figura 6.9) muestra la distribución espacial de los diagramas de Stiff del año 2008, con 22 muestras separadas en 3 familias claramente agrupadas: la familia Cl-Na obtuvo 8 muestras, las Cl-Ca 7 muestras y la familia HCO₃-Na 7 muestras. El tipo de agua que se encuentra más cercano al océano es el tipo Clorurada-Cálcica, la siguiente es la familia Clorurada-Sódica y finalmente la Bicarbonatada-Sódica.

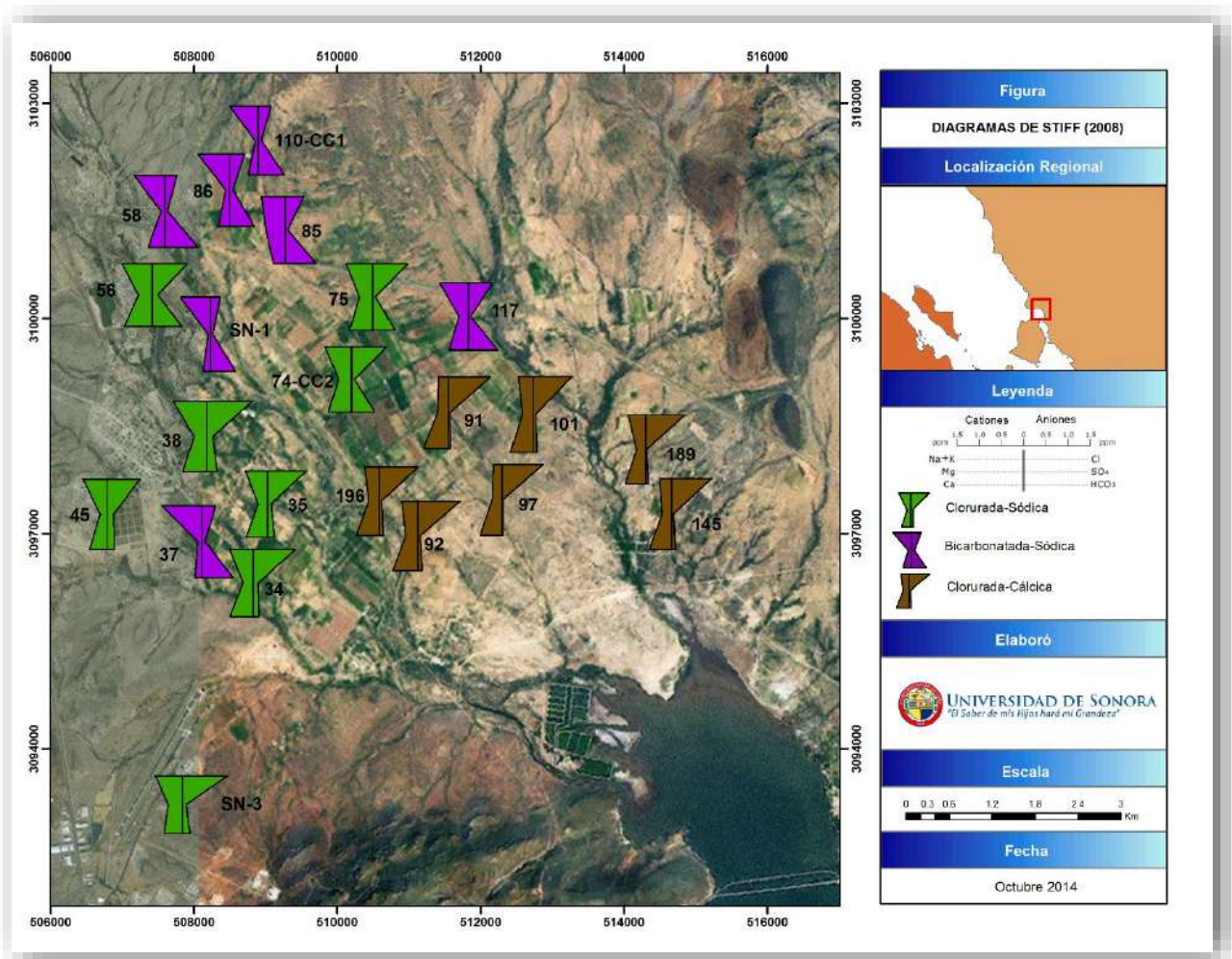


Figura 6.9. Diagrama de Stiff (2008).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



El siguiente plano (Figura 6.10) muestra la distribución espacial de los diagramas de Stiff del año 2009, donde la familia dominante pertenece al gua de tipo Clorurada-Sódica y solo una muestra (SN-28) pertenece a la familia Bicarbonatada-Sódica.

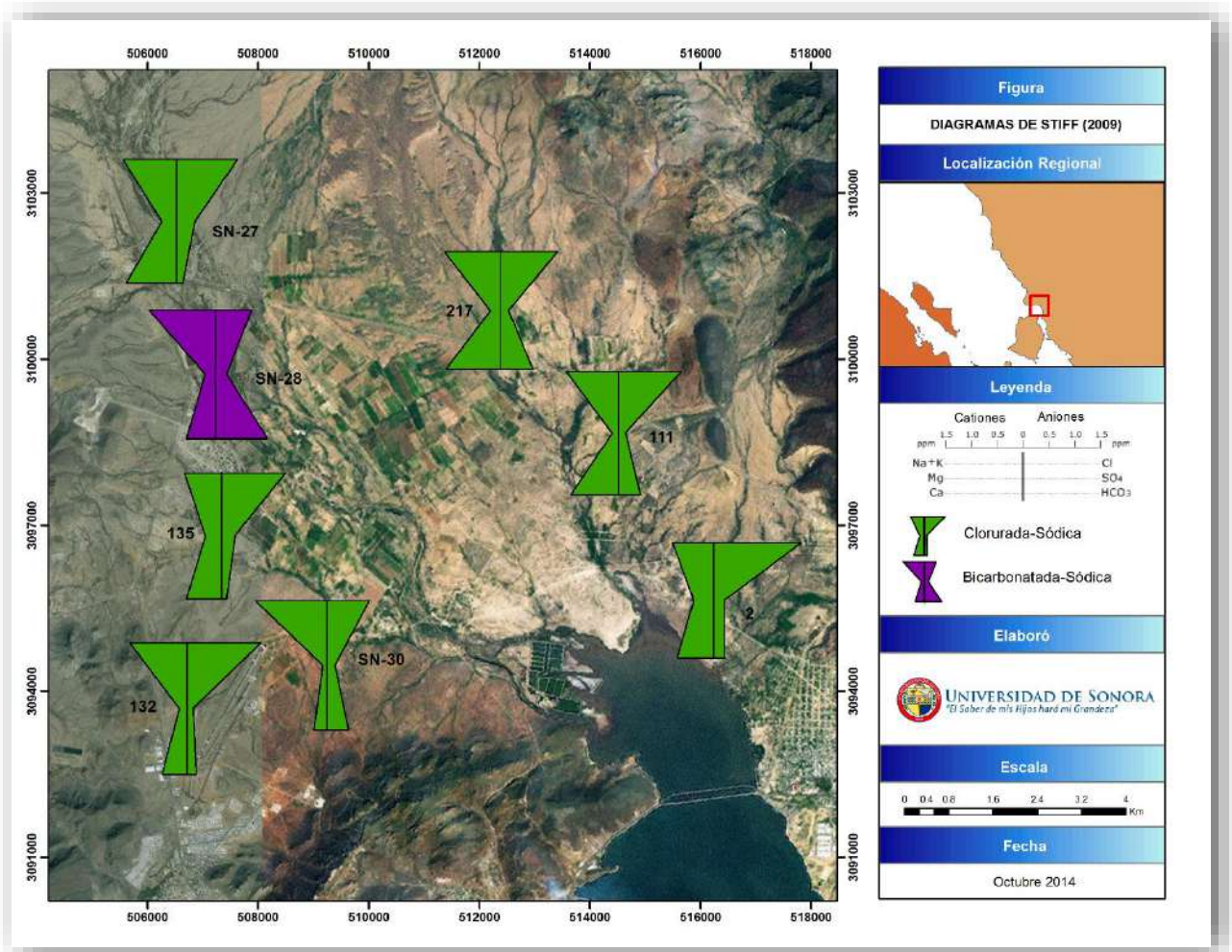


Figura 6.10. Diagrama de Stiff (2009).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



Para el año 2012 solo se muestrearon 5 aprovechamientos de los cuales solo se obtuvieron 2 tipos de familia: la Clorurada-Sódica y Clorurada-Cálcica, donde 4 muestras pertenecen al tipo Cl-Na y la muestra restante a la Cl-Ca (Figura 6.11).

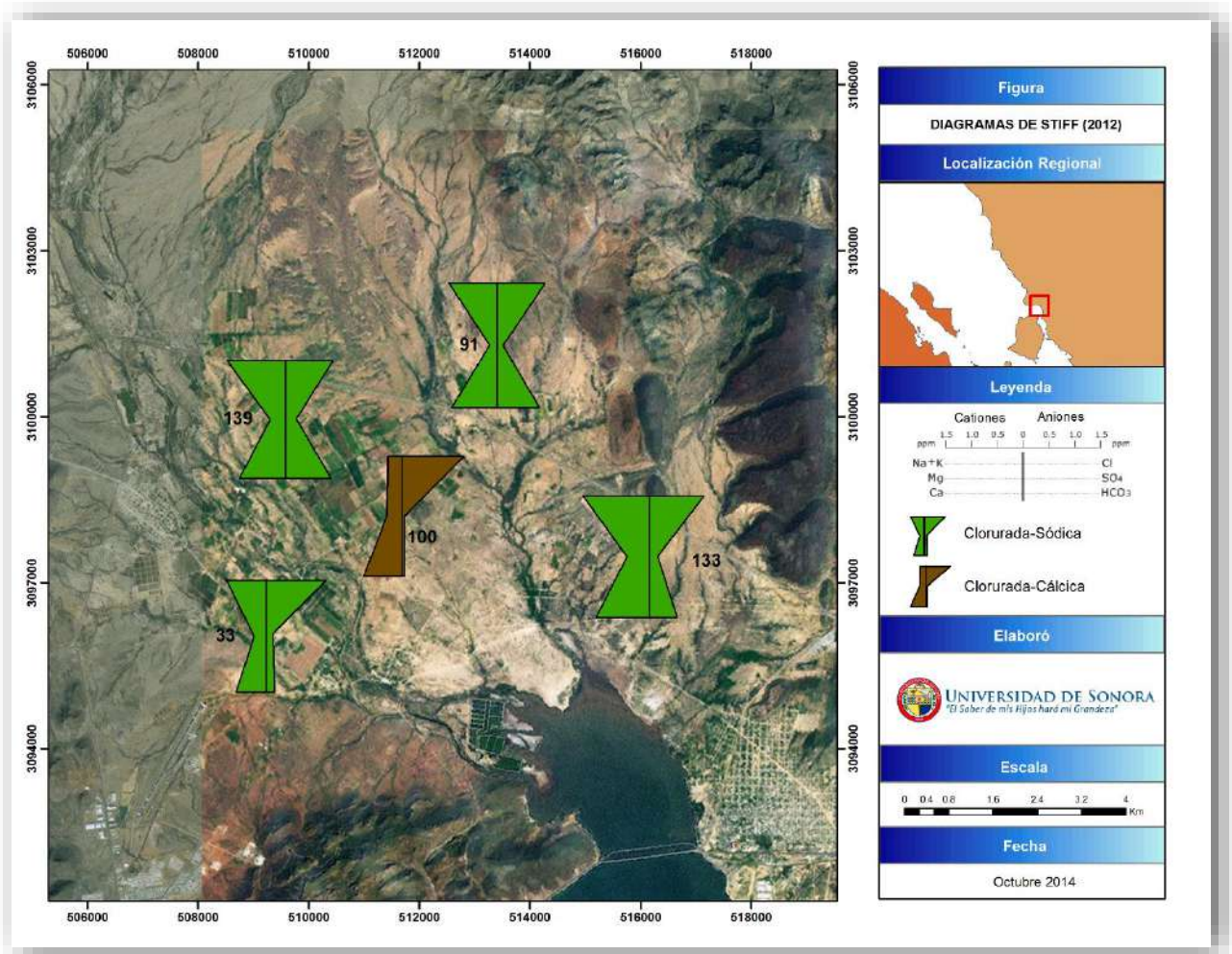


Figura 6.11. Diagrama de Stiff (2012).



6.4.1.2 Cloruros

La relación del agua con el medio geológico es uno de los principales factores que determinan la presencia del ion cloruro en agua subterránea. No se conocen efectos nocivos para la salud humana provocados por este ion, pero cuando rebasa los 300 mg/L el agua tiende a tomar un sabor salado. El cloruro es altamente soluble y estable. La NOM-127-SSA1-1994 establece un límite máximo permisible de 250 mg/L.

Las rocas como las evaporitas y rocas de origen marino contienen cantidades considerables de cloruros, sin embargo, la mayoría de las rocas presentan escasa proporción de cloruros.

Dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. El agua de lluvia puede ser una fuente importante de ion cloruro, especialmente en zonas próximas a la costa, los valores disminuyen rápidamente hacia el interior de la zona continental.

La concentración de cloruros en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de 10 mg/L a más de 3000 mg/L. En salmueras naturales, próximas a la saturación de NaCl, puede llegar a casi 200,000 mg/L. El agua de mar contiene alrededor de 20,000 mg/L.

De acuerdo con la configuración de isolíneas de valores de cloruro, se observa que en 2008 existen valores altos (Figura 6.12) en la parte sureste del acuífero San José de Guaymas. La noria 97 muestra el valor más alto de cloruros con 3350.3 mg/L, evidenciando la posible entrada de agua del mar. Los pozos 91, 92, 149 y 185, muestran valores medios que se pueden asociar a una zona de mezcla del agua subterránea con el agua intrusada conocida como Zona de Interfase.

Los pozos 91, 92, 149, 185 y 97 son ejemplos de aprovechamientos que en ese entonces se encontraban rebasando los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-127-SSA1-1994 y que poseen baja calidad de agua para uso y consumo humano.



Los pozos muestreados en la parte norte presentan valores bajos, indicando estar cercanos a una posible zona de recarga (como es el caso de los aprovechamientos SN1, 110CC1, 58, 75 y 117).

Para el caso de 2009, el muestreo se realizó después del Huracán Jimena. Este fenómeno meteorológico afectó seriamente la calidad del agua de diversos aprovechamientos. La distribución de las isolíneas, muestra que los pozos 2, 135 y SN-27 (Figura 6.13) presentan los valores más altos en cloruros. La cantidad de cloruros en el pozo 2, se puede asociar a que este se encuentra en la zona de interfase (mezcla de agua dulce con agua salobre). Para el caso del aprovechamiento 132, estos valores se deben a que este pozo se encuentra sobre rocas de origen evaporíticos y enriquecen en sales disueltas el agua que de este se extrae.

La noria SN-27 presentó 972 mg/L de cloruro, se puede asociar este valor a la incorporación de aguas que lavaron suelos en la zona de recarga e incorporaron sales que contienen el ion.



Hidgeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

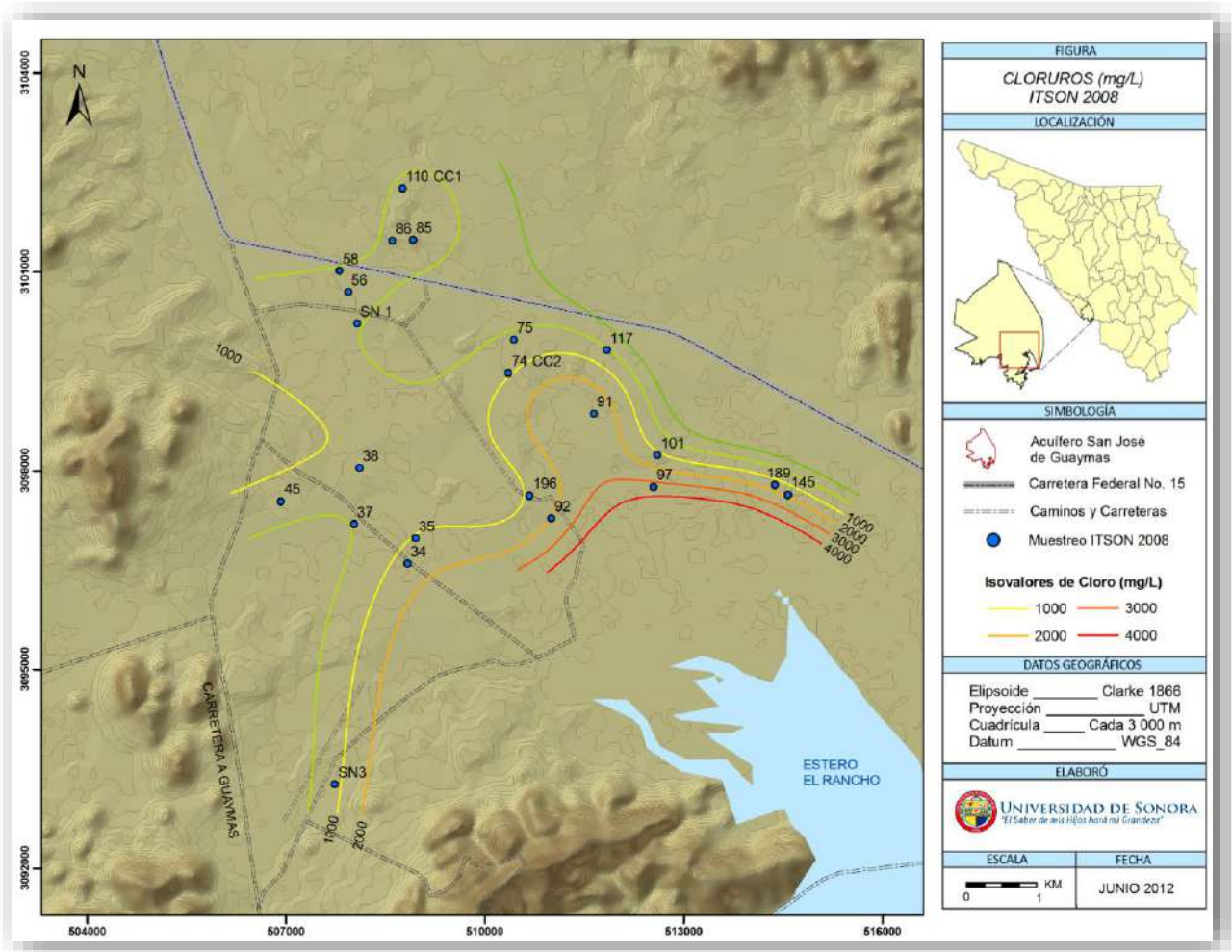


Figura 6.12. Distribución de isovalores de Cloruro (ITSON, 2008).

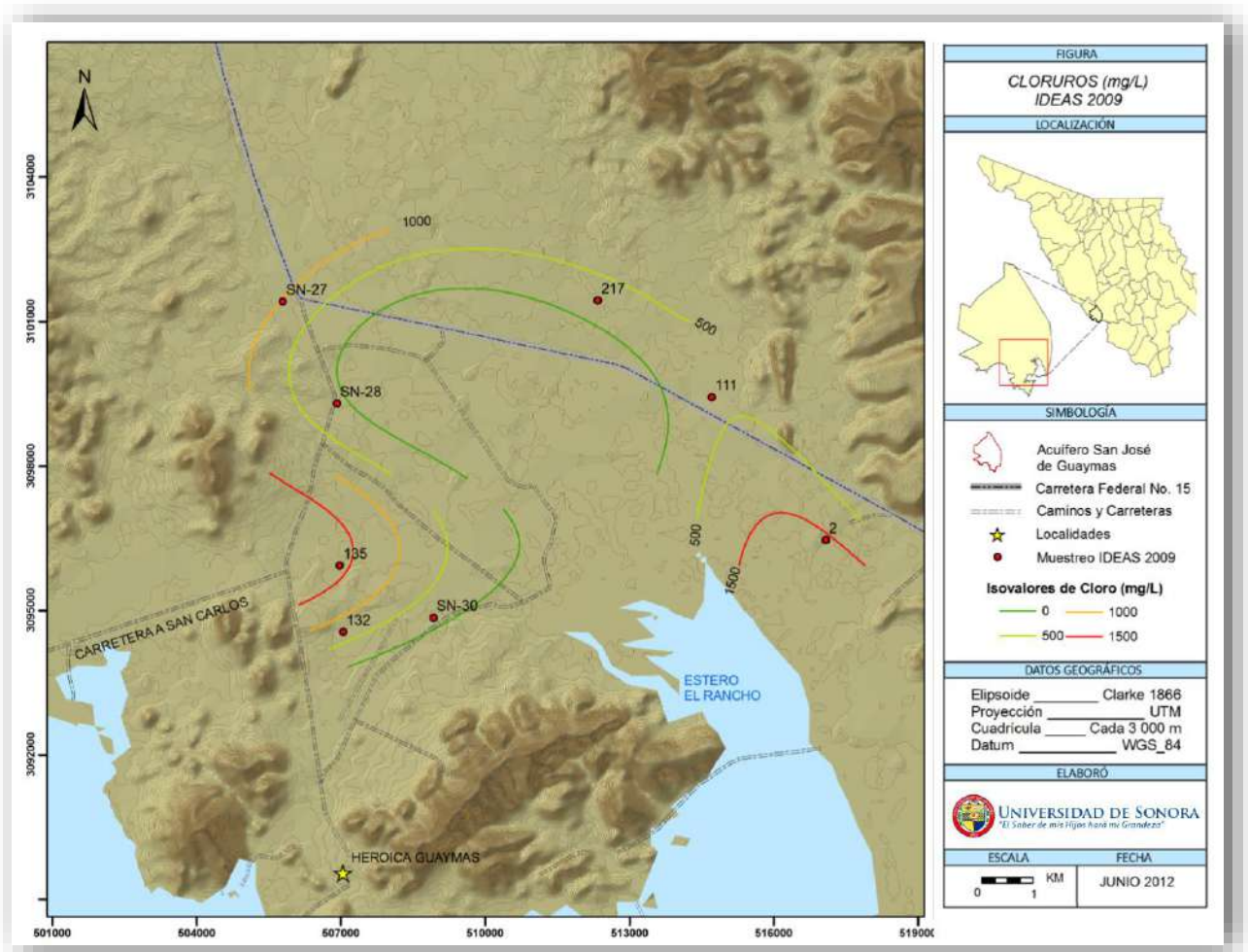


Figura 6.13. Distribución de isovalores de Cloruro (IDEAS, 2009).

A partir de las isolíneas elaboradas con los datos de 2012, se observa en la parte norte que los pozos 139, 113 y 100 (Figura 6.14) muestran los valores más bajos de cloruros, dado que se encuentran cercanos a la zona de recarga, evidenciando agua de reciente infiltración. El pozo 33 muestra un valor de 1190 mg/L de cloruros, siendo este un valor alto; se puede asociar dicho valor a la presencia de rocas evaporitas que se encuentran en el medio geológico y que aportan este anión al agua subterránea.

El pozo 91 muestra el valor más alto con 3070 mg/L, dicho valor se asocia a que este aprovechamiento se encuentra en la zona de interfase y extrae agua salobre.



De acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994, los aprovechamientos 33 y 91 son los únicos que rebasan el límite máximo permisible establecido por la norma y debido a esto el agua que de estos se extrae es de baja calidad para el uso y consumo humano.

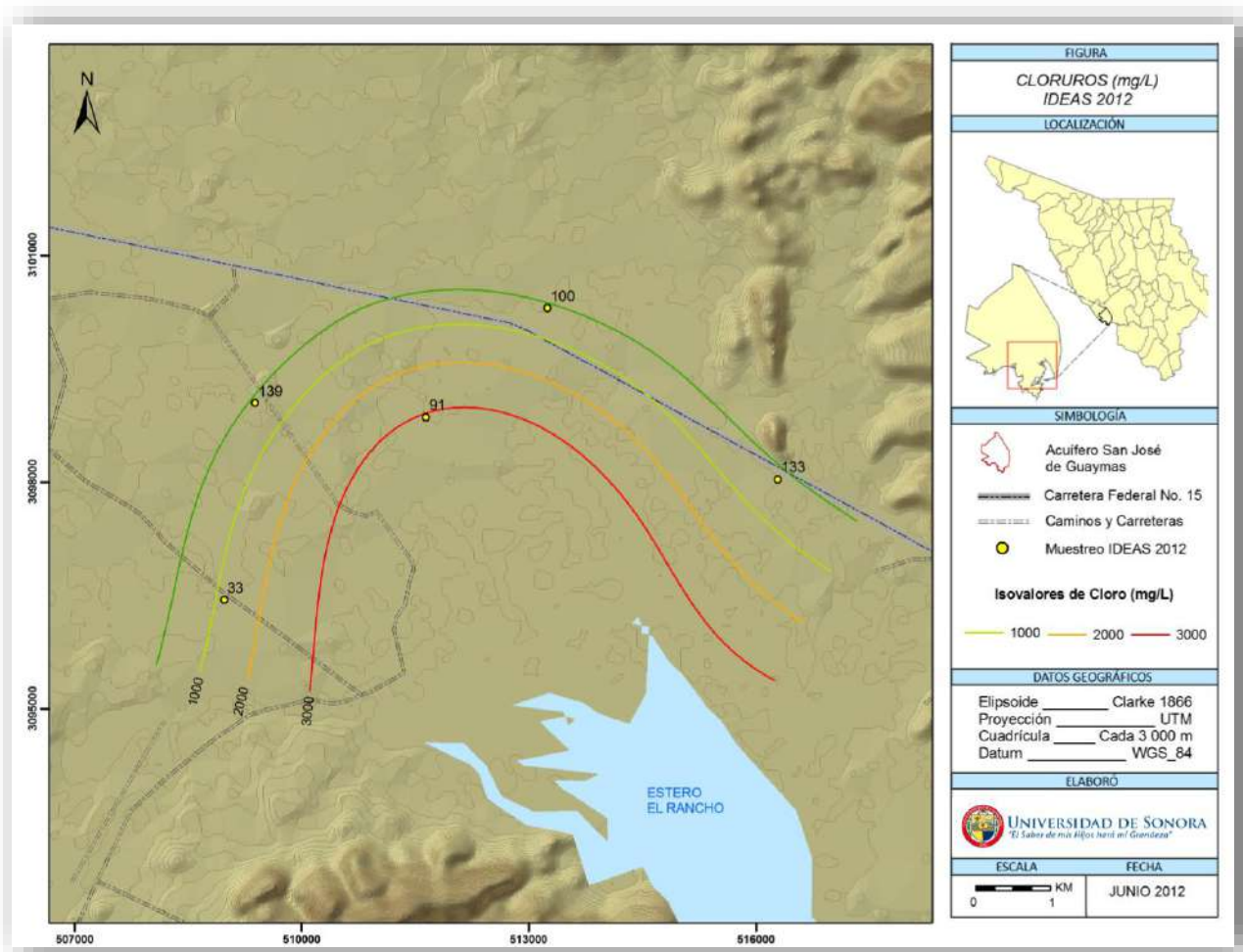


Figura 6.14. Distribución de isovalores de Cloruro (CEA, 2012).

6.4.1.3 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de una solución representa su capacidad para transportar la corriente eléctrica. Debido a que los iones son los responsables de la conducción de la electricidad, la conductividad eléctrica se relaciona con la concentración iónica total, de manera que es proporcional a la cantidad total de iones disueltos presentes en el agua, por lo que puede ser usada para dar una idea de los sólidos totales disueltos.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



Para el año 2008, a partir de los datos obtenidos por el ITSON se observa que la mayor conductividad eléctrica la presenta el pozo 97 con 9206.33 $\mu\text{S}/\text{cm}$, indicativo de agua con alto contenido de sales y minerales, en este caso se puede adjudicar a la interacción de agua subterránea con agua marina. Los pozos 89, 91, 92 y 145 (Figura 6.15) muestran valores alrededor de 8000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que permiten considerarlos dentro de la zona de interfase.

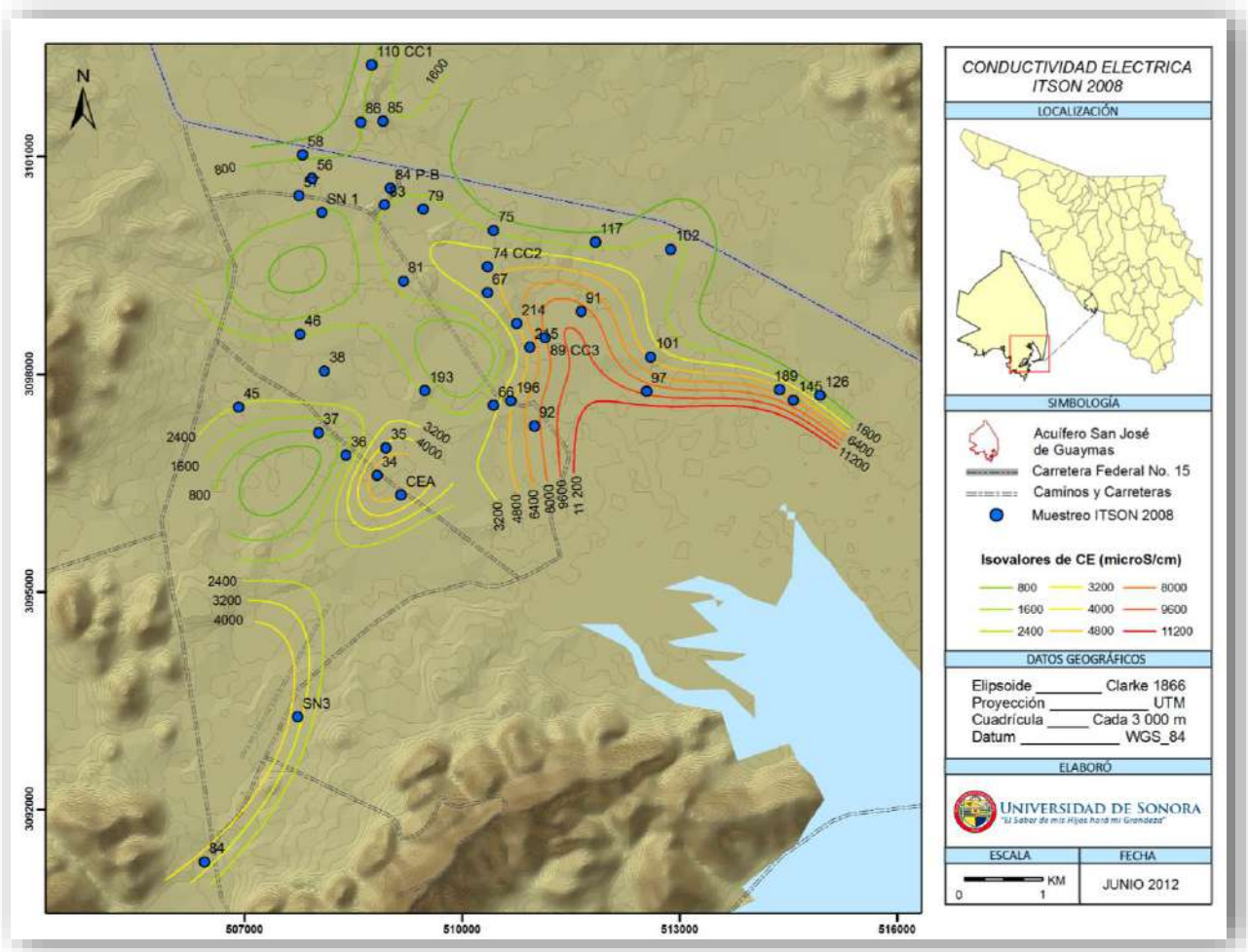


Figura 6.15. Distribución de isovalores de Conductividad Eléctrica (ITSON, 2008).

Con base en los datos obtenidos en 2009 por IDEAS, tres de los ocho pozos muestreados (SN-27, 2 y 136) presentan valores altos con respecto a la conductividad eléctrica. Dichos valores se adjudican a diferentes orígenes; en el caso del aprovechamiento SN-27, los valores de conductividad son elevados debido a una posible incorporación de agua con altos valores de sales y minerales que se infiltraron en la porción acuífera de la cual depende este. El



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



pozo 132 parece extraer agua que se encuentra disolviendo rocas de origen evaporíticos, las cuales incorporan iones que aumentan la conductividad. El aprovechamiento No. 2 se encuentra cercano al estero El Rancho y en una posible zona de interfase, por lo que tiene una C.E. alta debido a la mezcla del agua subterránea continental con agua marina (Figura 6.16).

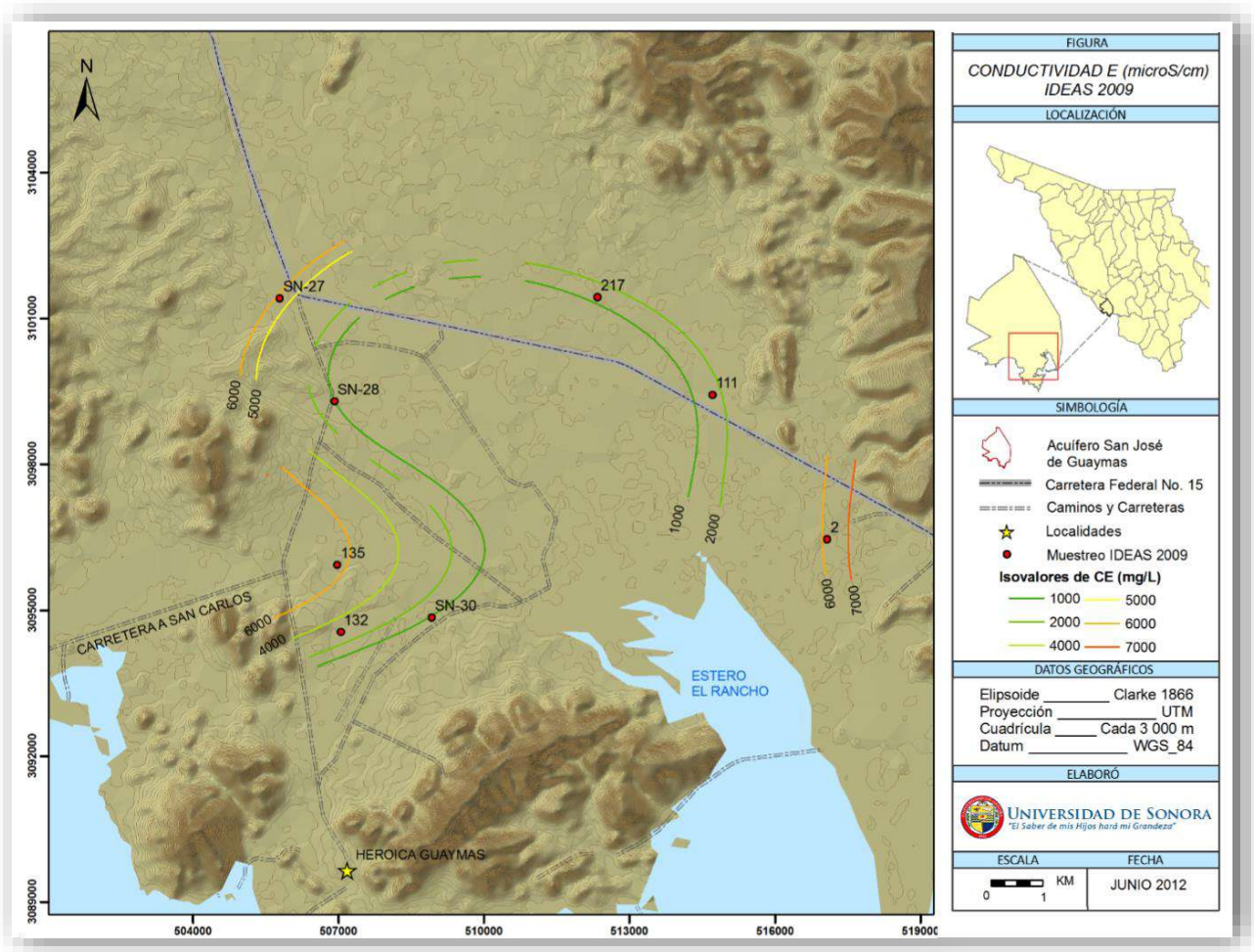


Figura 6.16. Distribución de isovalores de Conductividad Eléctrica (IDEAS, 2009).

Las curvas realizadas a partir de los valores de C.E. en el 2012 (Figura 6.17) muestran de manera clara que los aprovechamientos 91 y 97 se encuentran dentro de una zona altamente afectada por la mezcla de agua marina con el agua continental, presentando valores de 9428 y 9162 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente.



En la parte norte, los aprovechamientos SN-27, 45, 139, 217, 100 y 113 presentan agua con valores bajos de conductividad, que van de 752 a 1995 $\mu\text{S/cm}$, indicando así posibles zonas de recarga.

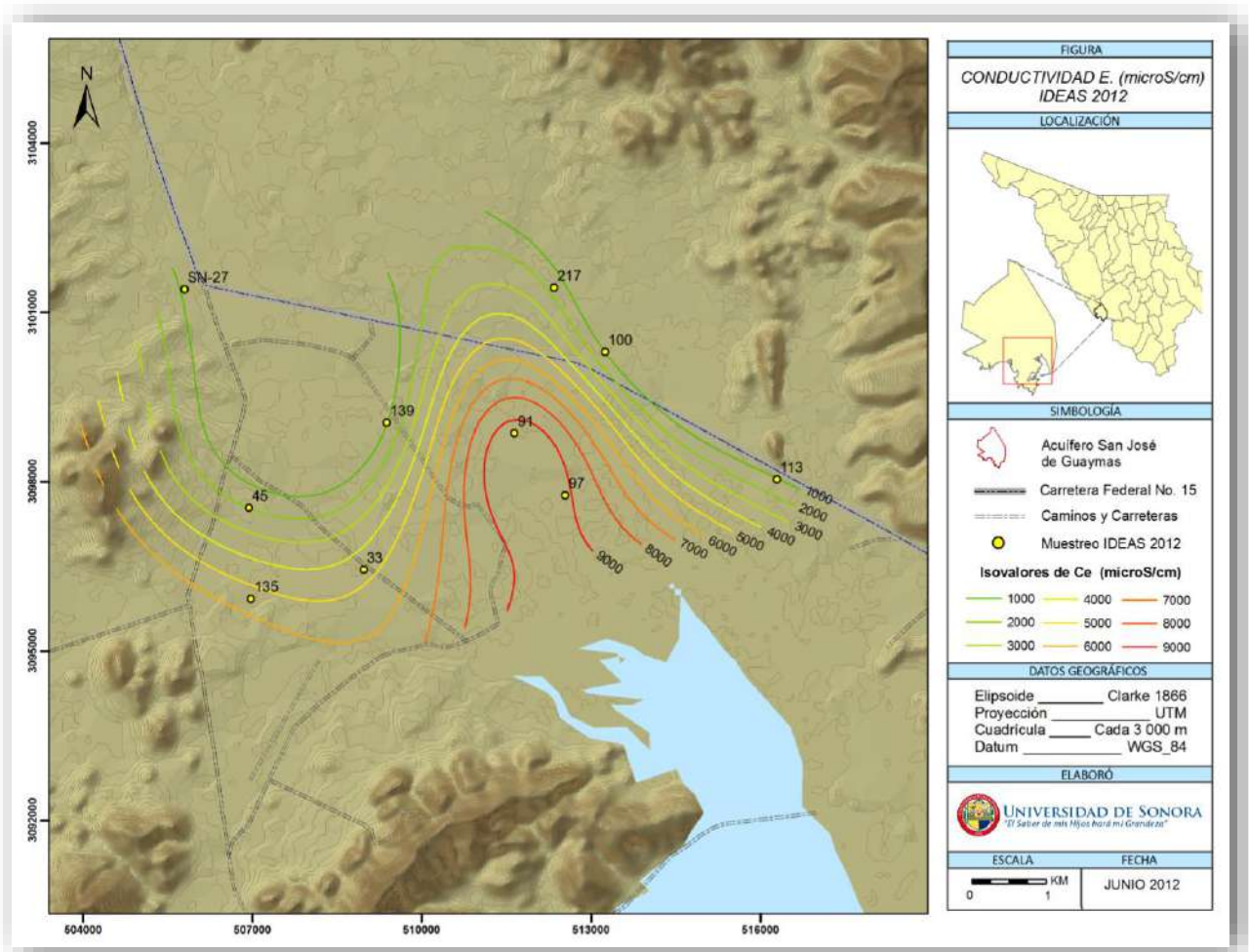


Figura 6.17. Distribución de isovalores de Conductividad Eléctrica (CEA, 2012).

6.4.1.4 Sólidos Totales Disueltos

Los Sólidos Totales Disueltos (STD), son todos aquellos elementos o materia suspendida que se encuentra en el medio acuoso; dicho parámetro se utiliza para conocer la calidad del agua, principalmente la salinidad, el cual se puede evaluar de acuerdo al esquema de la International Desalination Association (IDA) (Tabla 6.7), sin embargo la Norma Oficial Mexicana



establece un límite máximo permisible de 1000 mg/L, para una agua dulce, apta para el consumo humano.

Tabla 6.7. Clasificación del agua según la IDA.

Clasificación (según la IDA)	Sólidos Totales Disueltos (mg/L)
Agua Pura	<500 mg/L
Agua de Río o Baja Concentración	500 a <3000 mg/L
Agua Salobre	3000 a <20,000 mg/L
Agua Marina	20,000 a <50,000 mg/L
Salmuera	>50,000 mg/L

Dado que los STD se encuentran relacionados con la C.E. y son proporcionales, se puede generar una explicación similar para el caso de los isovalores de sólidos totales disueltos.

A partir de los datos obtenidos del análisis de muestras de agua subterránea 2008 se puede clasificar el agua que se extrae en cada aprovechamiento a partir de la clasificación establecida por la IDA.

Los pozos SN-1, 37, 110CC1, 86 y 58 (Figura 6.18) tienen agua de buena calidad, que se considera como agua pura y que contiene menos de 500 ppm de STD, además de encontrarse dentro del límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994. Otros aprovechamientos (117, 126, 84 P-B, 56, 57, 85, 83, 75, 36, 193 y 46) se encuentran por debajo del LMP con valores que van de 500 a menos de 1000 ppm. El agua de estos aprovechamientos es de buena calidad y se cataloga como agua de baja concentración.

Los valores más altos del año 2008 se presentan en los pozos 97 (6093 ppm) y 91 (5373 ppm), se asocian estos valores a la interacción del acuífero con agua proveniente del estero El Rancho.

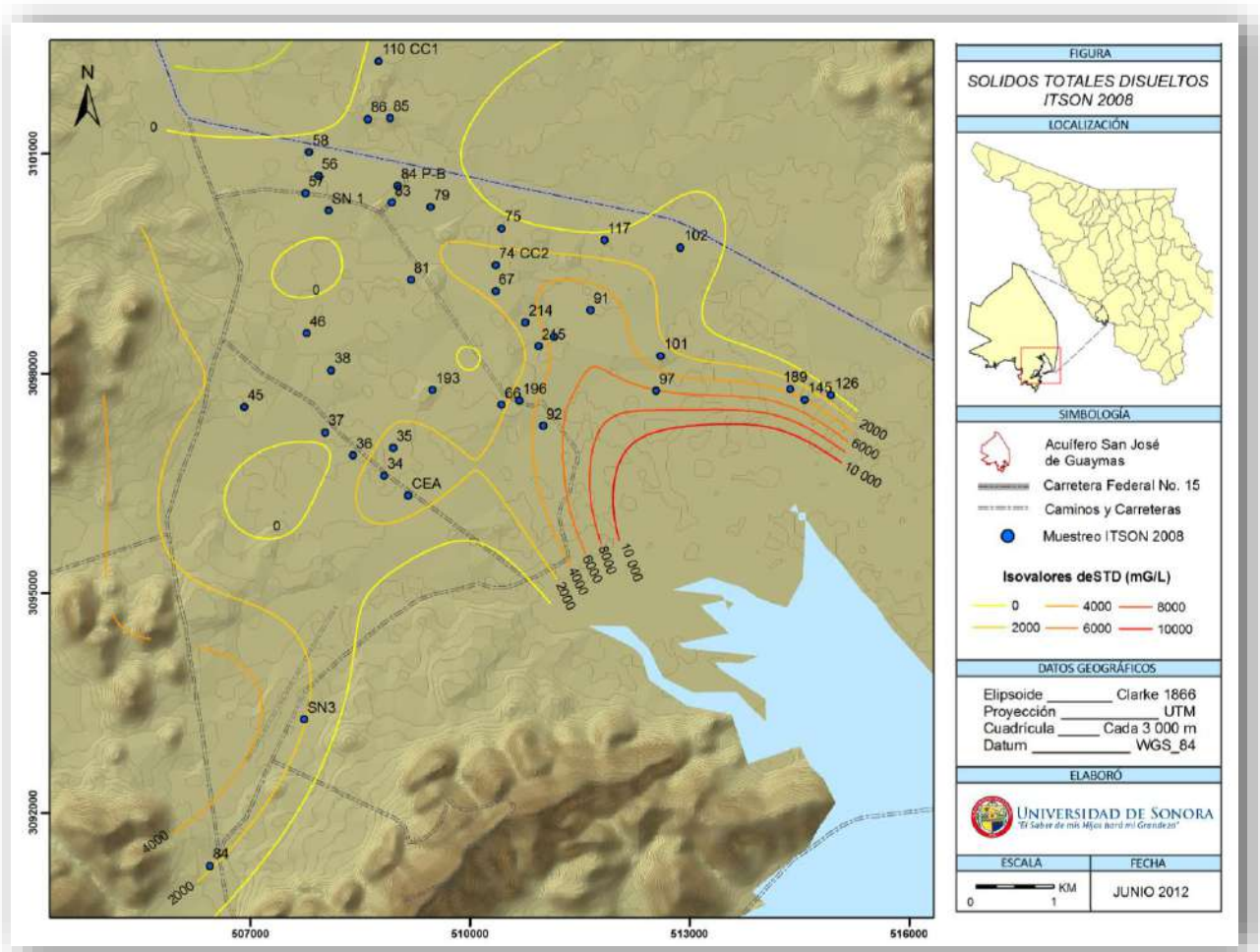


Figura 6.18. Curvas de Isovalores de Sólidos Totales Disueltos (ITSON, 2008).

En 2009, los valores obtenidos los pozos SN-28 (454 ppm), SN-30 (409 ppm), 111 (752) y 217 (583 ppm) presentan un contenido bajo de STD. Otros aprovechamientos presentan valores altos, como es el caso de la noria SN-27 (Figura 6.19) que para el año 2009 reportó un alto en sus contenido de sólidos, esto se asocia a la posible incorporación de agua de rápida infiltración que se encontraba enriquecida con elementos del suelo. El pozo 135 se encuentra sobre rocas evaporitas, por lo que la disolución de estas rocas hace que el agua subterránea tenga un enriquecimiento en sales y minerales. El valor de STD en el aprovechamiento 2 es de 2797 ppm, y que está relacionado con la zona de interfase producida por la entrada de agua del estero.



El pozo 91 y la noria 97 son los que en el muestreo de 2012 presentan los valores más altos de STD, con 4245 y 4136 ppm respectivamente. Estos aprovechamientos se consideran afectados por la mezcla de aguas, producto de la zona de interfase que se encuentra en esta porción del acuífero.

Al comparar los datos con los de 2008, el pozo 91 presentó 5373.67 ppm y la noria 97 tuvo 6093.67 ppm, indicativo de un descenso en los valores de STD y que se puede asociar a una posible interacción del acuífero con el agua del estero.

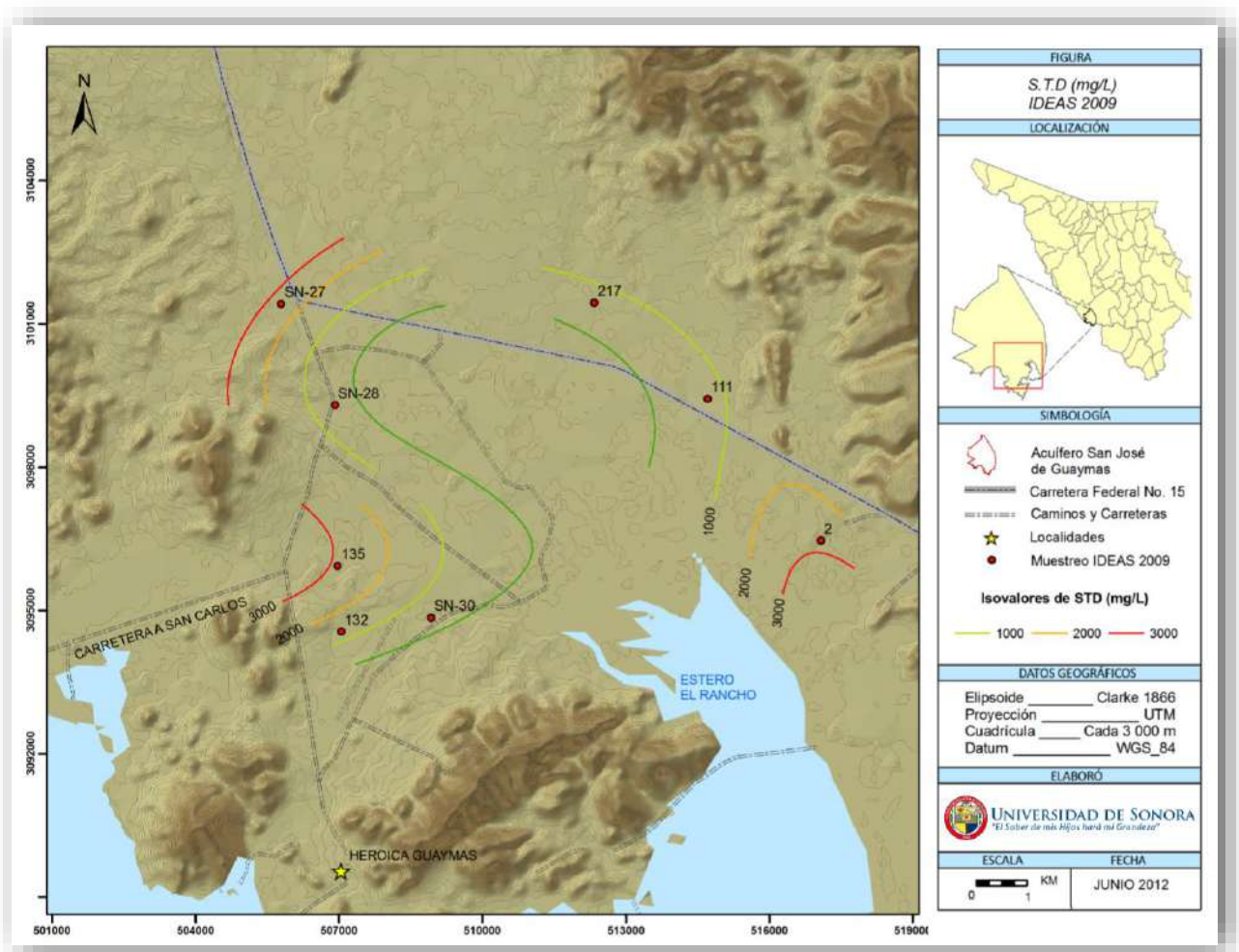


Figura 6.19. Isovalores de Sólidos Totales Disueltos (IDEAS, 2009).

El agua de los pozos 100, 113, 139 y SN-27 (Figura 6.20) presenta valores por debajo de las 500 ppm de STD, por lo que se considera agua pura de acuerdo con la clasificación de la



**Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.**



IDA; los aprovechamientos 45 y 217 rebasan las 500 ppm y se les considera de agua de baja concentración; dentro de la NOM-127-SSA1-1994 el agua extraída de estos pozos se encuentra por debajo del límite máximo permisible establecido.

Comparando los datos obtenidos en 2009 y 2012 de la noria SN-27, se observa una disminución drástica, ya que en 2009 presento 2573 ppm, valor que se asocia a la incorporación de agua proveniente de las precipitaciones generadas por el huracán Jimena que durante el escurrimiento se enriqueció de elementos disueltos y que se infiltró rápidamente de manera vertical, debido a los materiales aluviales que conforman esa porción del acuífero; actualmente los valores disminuyeron, debido a que no se han presentado otros fenómenos meteorológicos que incorporen agua saturada al medio.

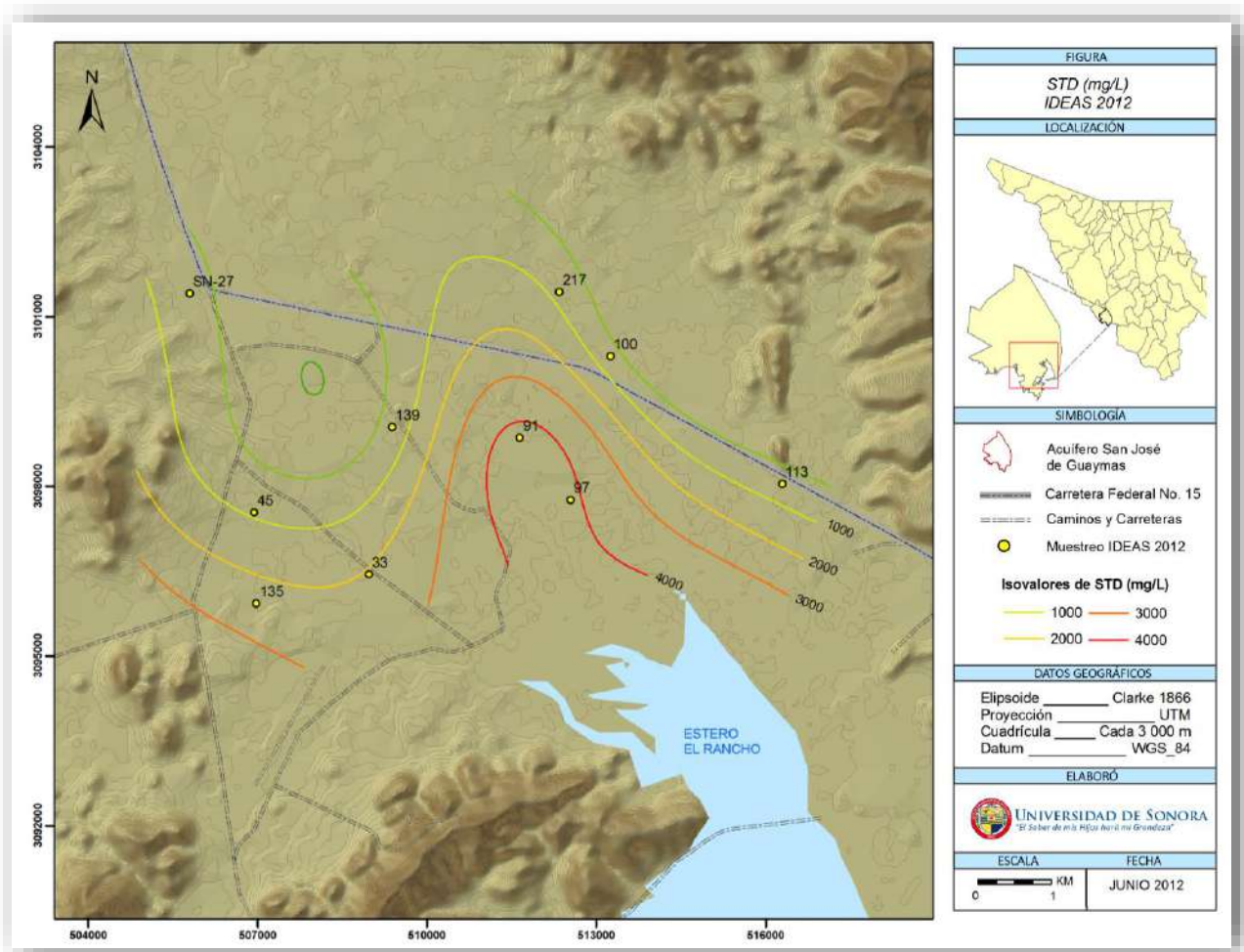


Figura 6.20. Isovalores de Sólidos Totales Disueltos (CEA, 2012).

6.4.1.5 Fluoruros

En el agua se encuentran asociados a varios elementos, para el caso del agua dulce se asocian al aluminio y en el agua de mar con calcio y magnesio. Cuando el ser humano lo consume en grandes dosis tiende a afectar la dentadura y los huesos. Para agua de consumo humano la Norma Oficial Mexicana propone un LMP de 1.5 mg/L.

Los valores de Fluoruros para 2008 se encuentran en un rango de 0.5 a 1.1 mg/L (Figura 6.21) y de acuerdo con la NOM-127-SSA1-1994 los aprovechamientos se encuentran



por debajo del límite máximo permitido que es de 1.5 mg/L, no afectando a la población que en aquel tiempo consumió el agua.

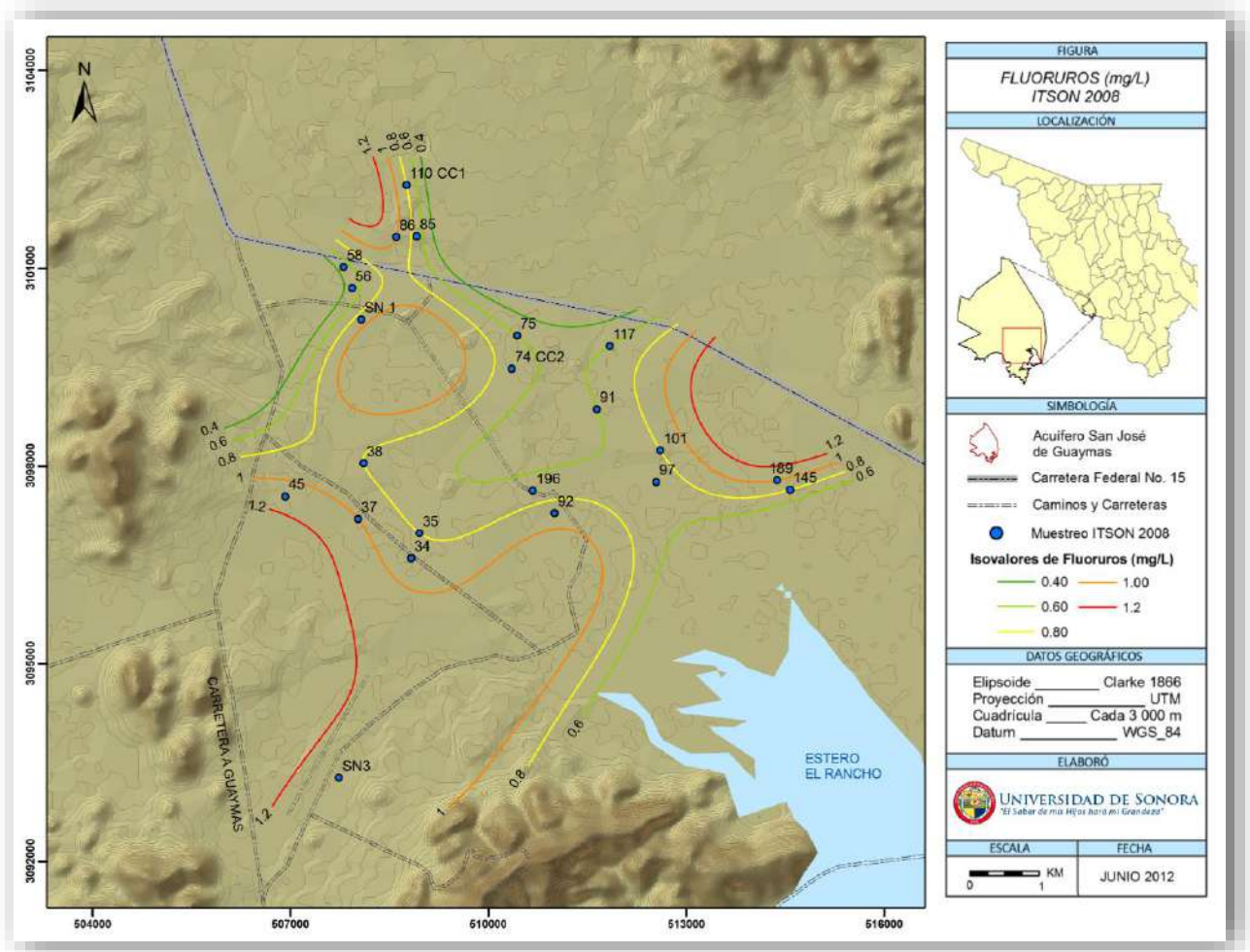


Figura 6.21. Isovalores de Fluoruros (ITSON, 2008).

En 2009 los pozos muestreados por IDEAS no presentan valores altos de fluoruros, los pozos que tienen los valores más altos son el 132 con 1.16 mg/L y el 135 que presento 1.20 mg/L (Figura 6.22). Al igual que en 2008 los valores se encuentran por debajo del LMP.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

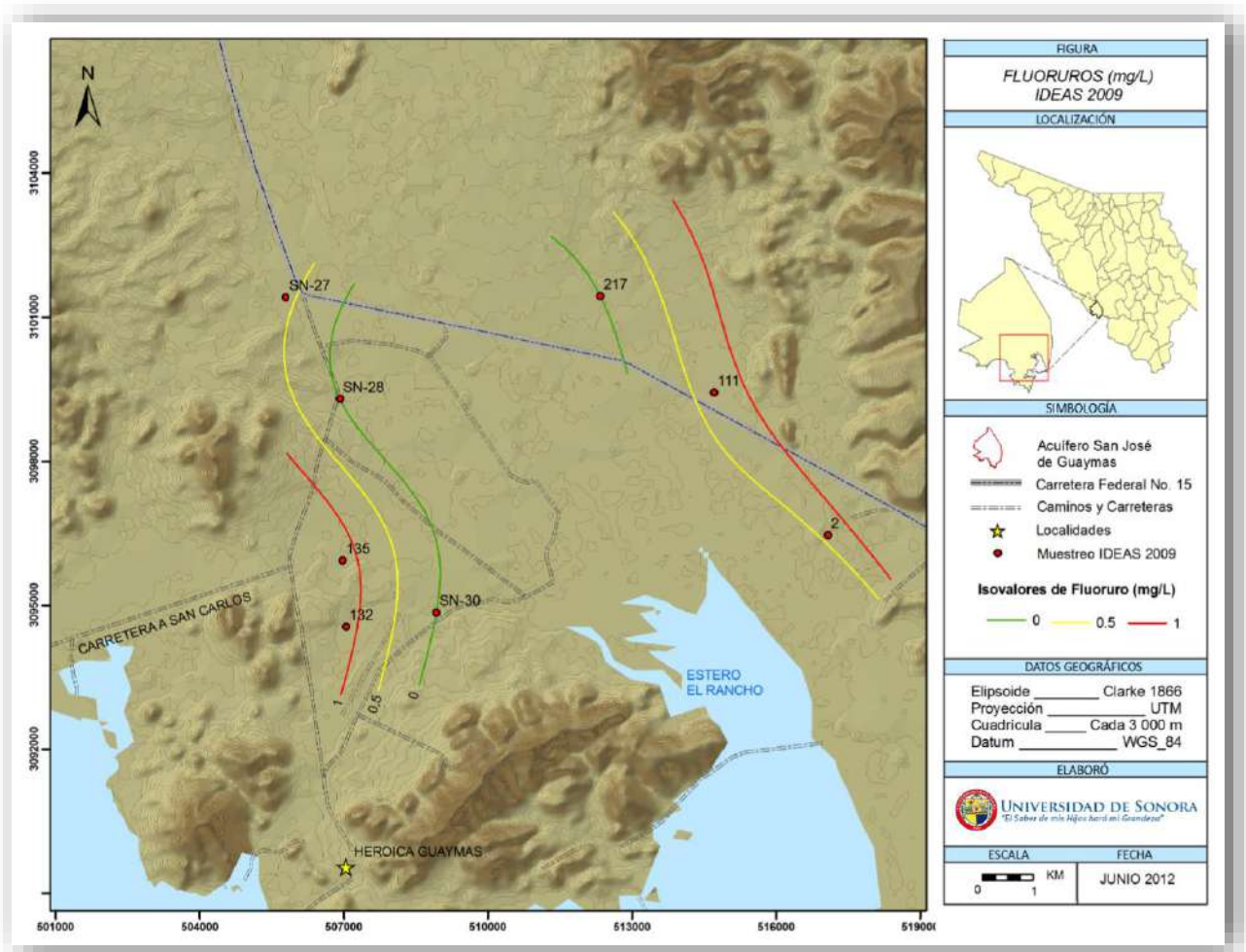


Figura 6.22. Isovalores de Fluoruros (IDEAS, 2009).

Los cinco pozos muestreados en 2012 muestra concentraciones que van de 0 a 0.8 mg/L (Figura 6.23), valores más bajos que en los muestreos pasados y que siguen definiendo el bajo contenido del ion fluoruro en el acuífero San José de Guaymas.

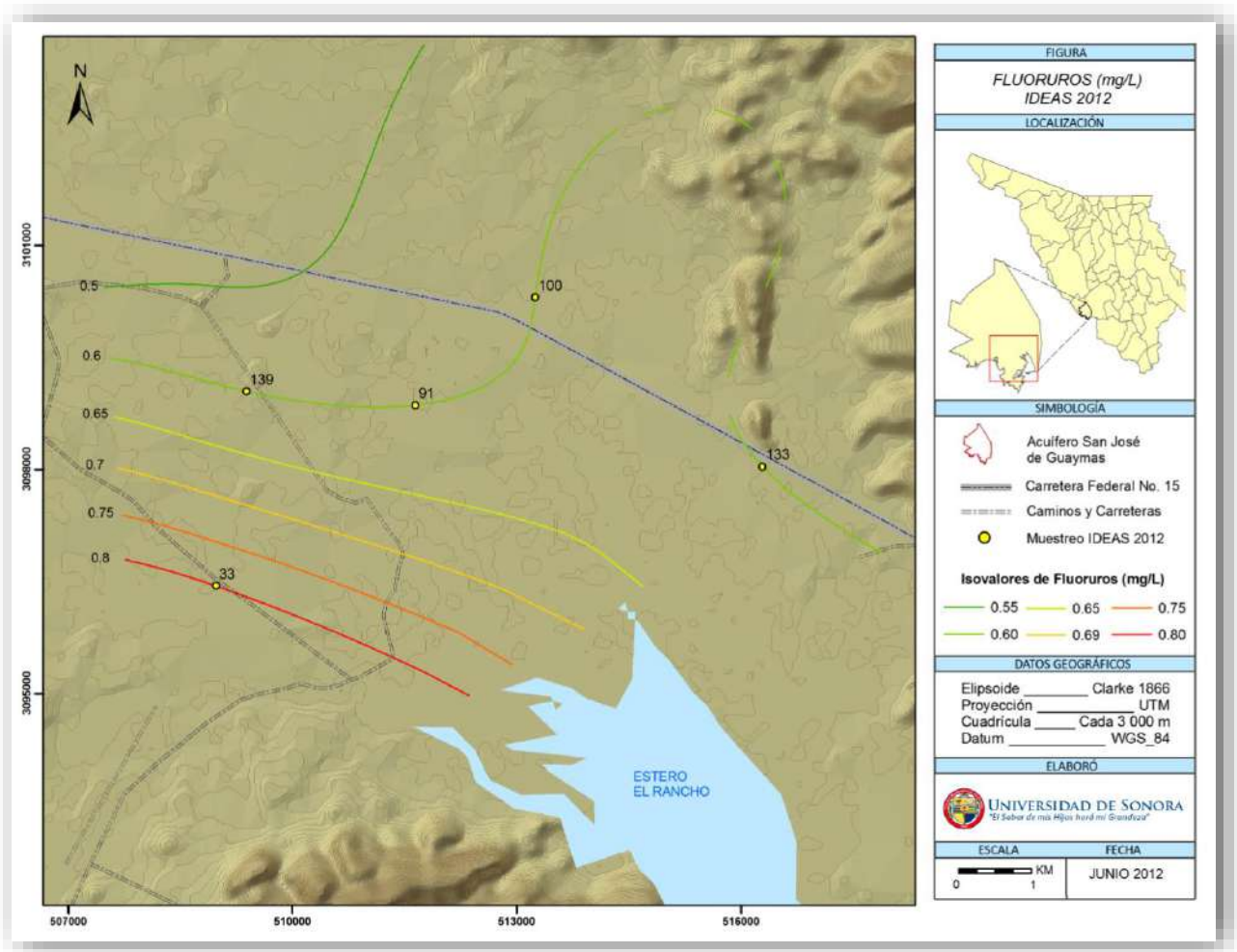


Figura 6.23. Isovalores de Fluoruros (CEA, 2012).

6.4.1.6 Magnesio

El Magnesio es menos abundante que el calcio en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas (dolomías y calizas magnesianas), evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de agua marina.

Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de magnesio en aguas subterráneas. En ellas, el magnesio es retenido con preferencia al calcio en suelos y rocas. En aguas naturales los contenidos de ion magnesio no suele sobrepasar los 40 mg/L. En



terrenos calcáreos pueden rebasarse los 100 mg/L y en terrenos evaporíticos pueden alcanzarse valores de 1000 mg/L.

Las curvas generadas a partir de los valores obtenidos en 2008, muestran una concentración alta en valores de magnesio de más 200 mg/L en los aprovechamientos 91 (240 mg/L) y 97 (271.2 mg/L) (Figura 6.24), la cantidad de magnesio reportado se puede asociar a la mezcla del agua oceánica con agua continental, dado que el agua de mar tiene un contenido alto de Mg.

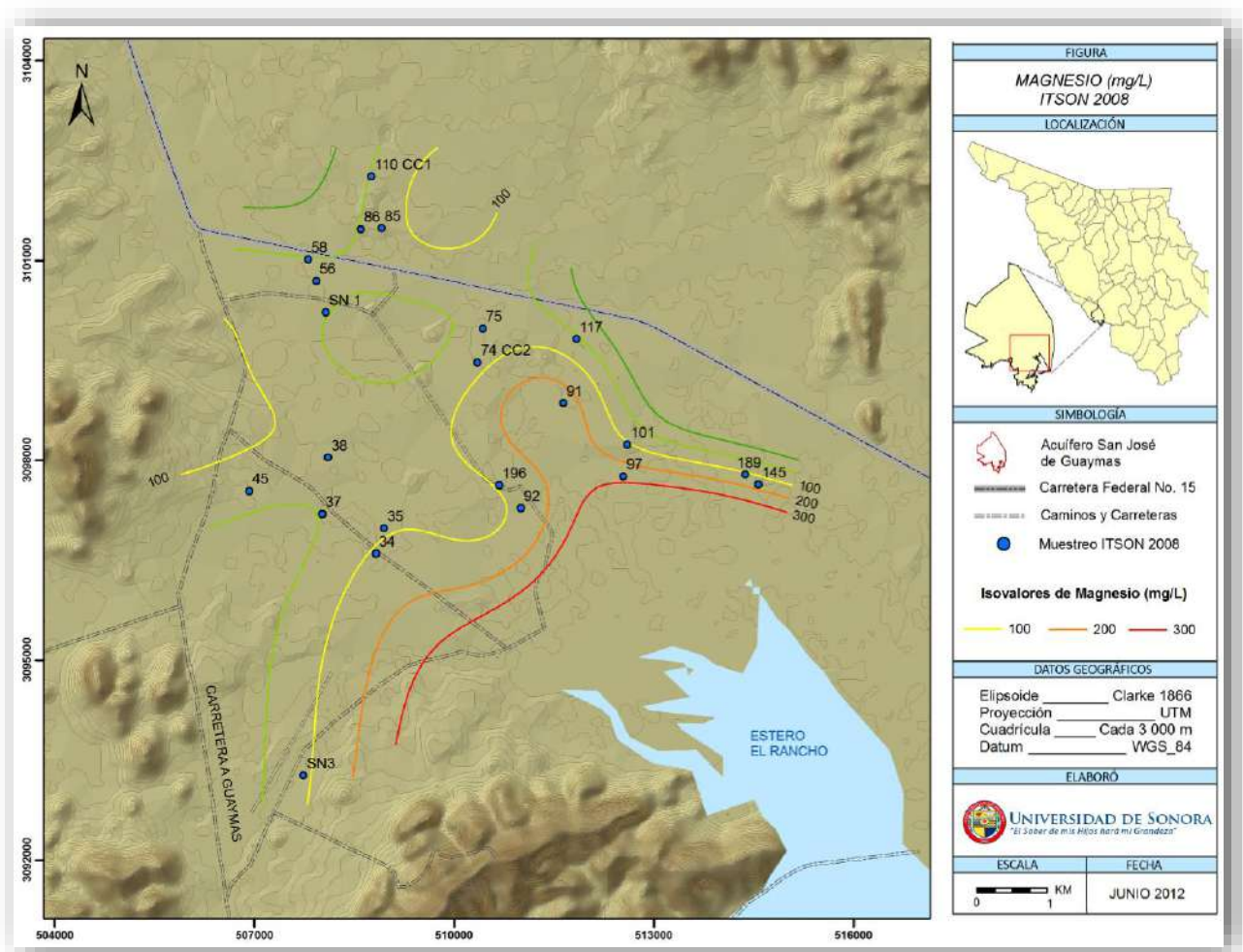


Figura 6.24. Isovalores de Magnesio (ITSON, 2008).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



En el año 2009 el mayor valor se registró en el pozo 2 (Figura 6.25), el cual presentó 148 mg/L del catión, esto se puede asociar a la zona de interfase que aunque no esta tan enriquecida por el agua de mar, existe un aporte que le da estas características.

En el 2012, las concentraciones más altas de magnesio se registraron en el pozo 91 el cual presentó 268 mg/L (Figura 6.26), esto evidencia un aumento en el contenido de magnesio en comparación con el dato del mismo pozo obtenido en 2008 por el ITSON. Se puede asociar dicho valor a la extracción de agua proveniente de la zona de interfase.

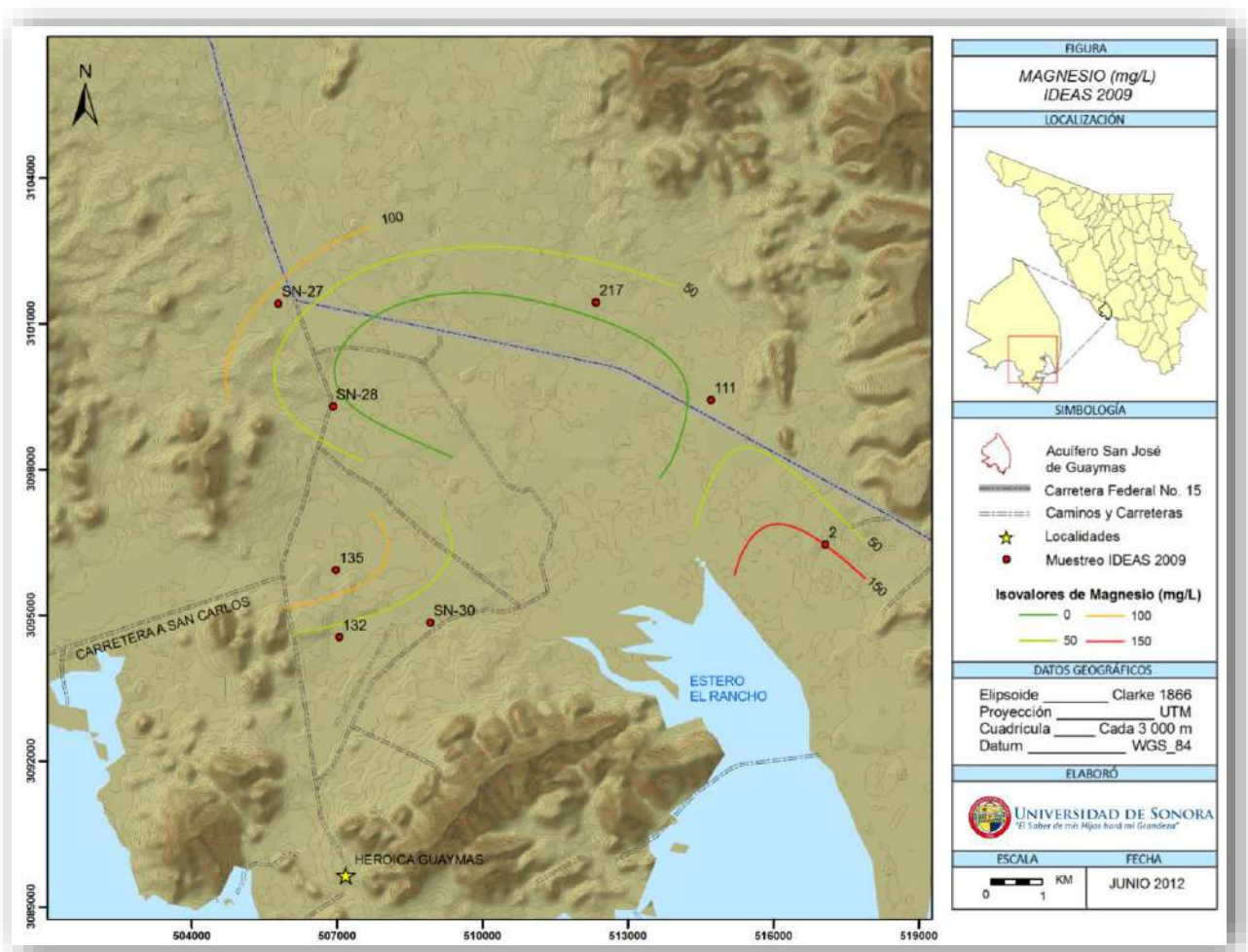


Figura 6.25. Isovalores de Magnesio (IDEAS, 2009).

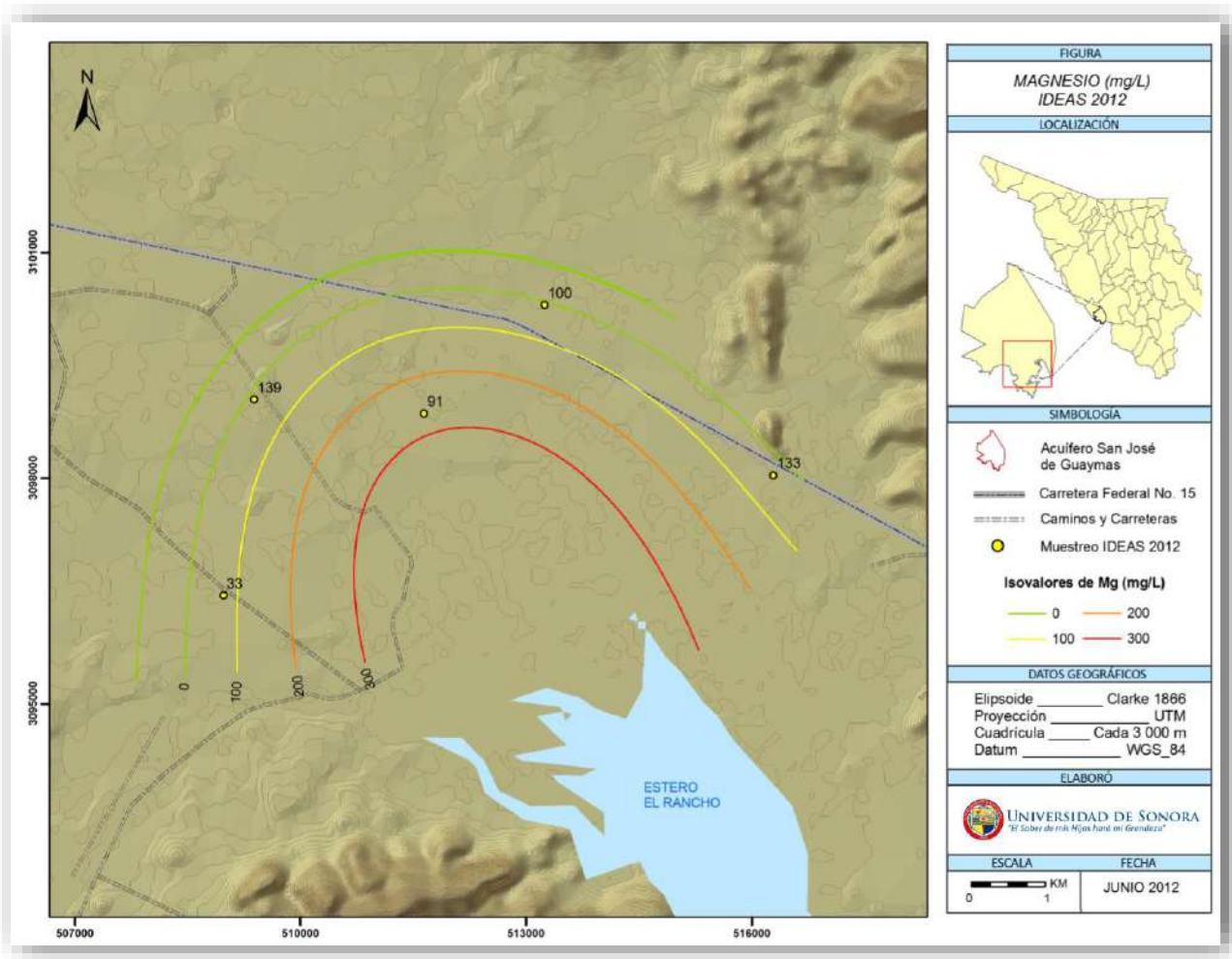


Figura 6.26. Isovalores de Magnesio (CEA, 2012).

6.4.1.7 Bromuros

El anión bromuro es abundante en agua de mar (65 mg/L) y casi inexistente en aguas dulces, por lo cual es un buen indicador de intrusión marina. Se determina por espectrofotometría visible o cromatografía iónica. Los resultados de la determinación de bromuro en el agua subterránea en el acuífero San José de Guaymas en el 2008, indican que existen valores altos en pozos cercanos al estero "El Rancho", tales como el 91, 92 y 97 (Figura 6.27). Estos resultados son indicativos de que estos aprovechamientos se encuentran sobre la zona de mezcla o interfase y por tanto el agua que se extrae de ellos se encuentra enriquecida por elementos mayoritarios del agua marina.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

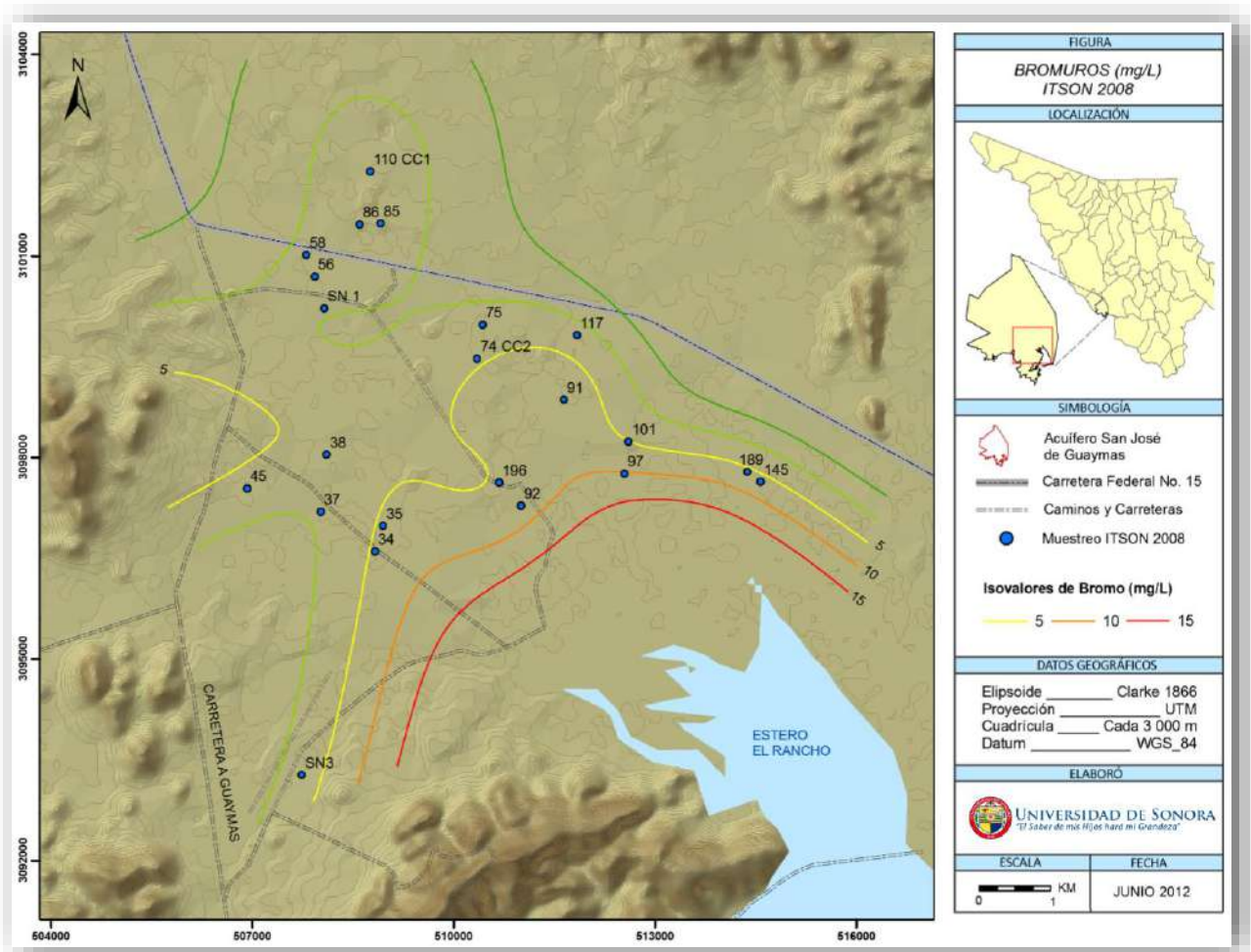


Figura 6.27. Isovalores de Bromuros (ITSON, 2008).

El muestreo realizado por IDEAS en 2009 muestra que los aprovechamientos 135 y 2 tienen los valores más altos de la zona de estudio. El pozo 135 se localiza en una zona de depósitos evaporíticos, que al estar en contacto con el agua subterránea se disuelven e incorporan bromuros que se encuentran en estos depósitos desde su formación. Para el caso del pozo 2 (Figura 6.28) se puede asociar el valor a la zona de mezcla sobre la cual se sitúa, dado que el agua de mar se combina con el agua dulce y la enriquece con elementos que esta contiene.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

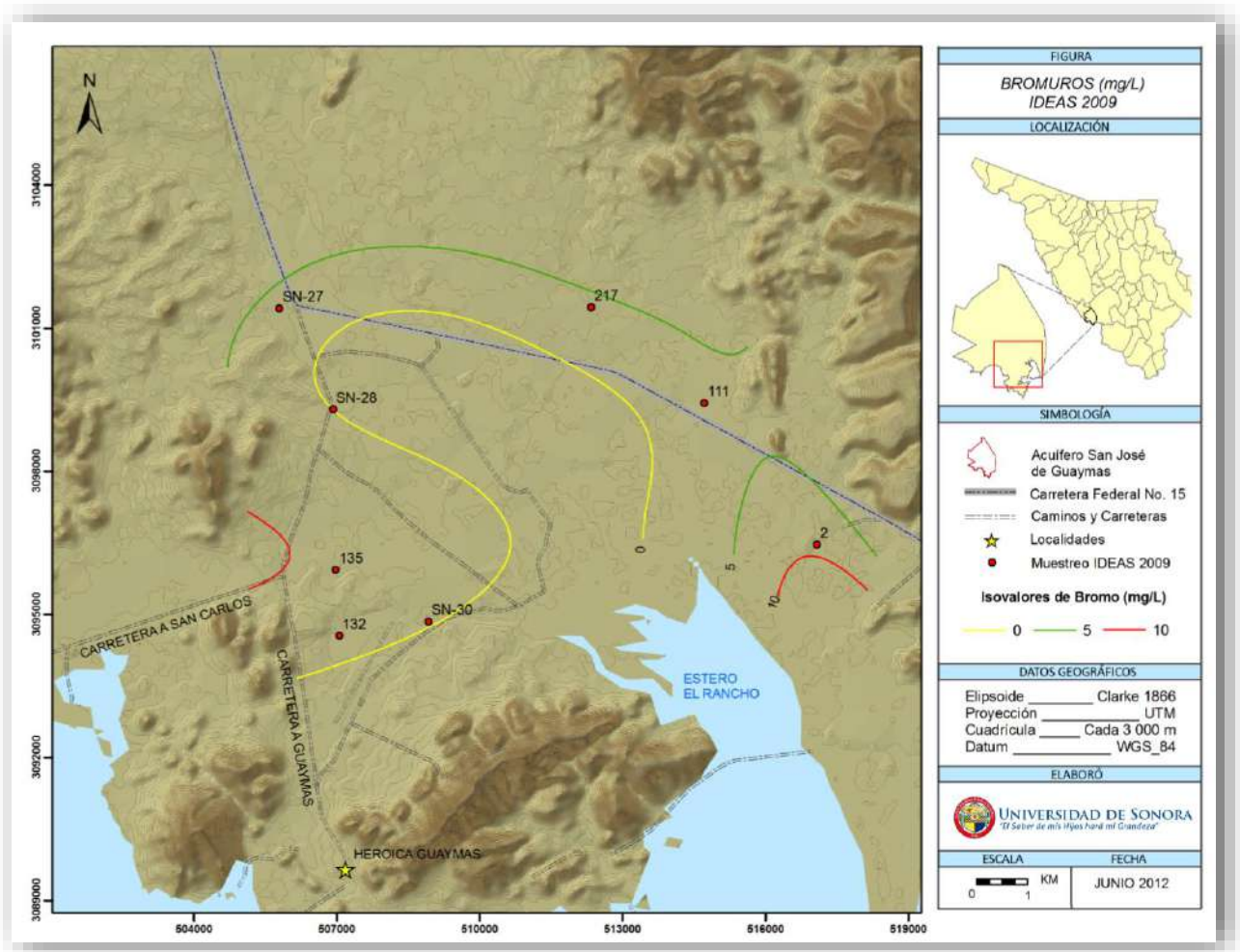


Figura 6.28. Isovalores de Bromuros (IDEAS, 2009).

En el 2012, el aprovechamiento 91 es el que contiene el mayor valor de bromuros con 9.5 mg/L (Figura 6.29), lo cual indica la mezcla constante con agua del estero; al comparar con el dato de 2008, se observa un ligero aumento, que se puede atribuir al avance de la zona de interfase, debido al sobrebombeo de este pozo.

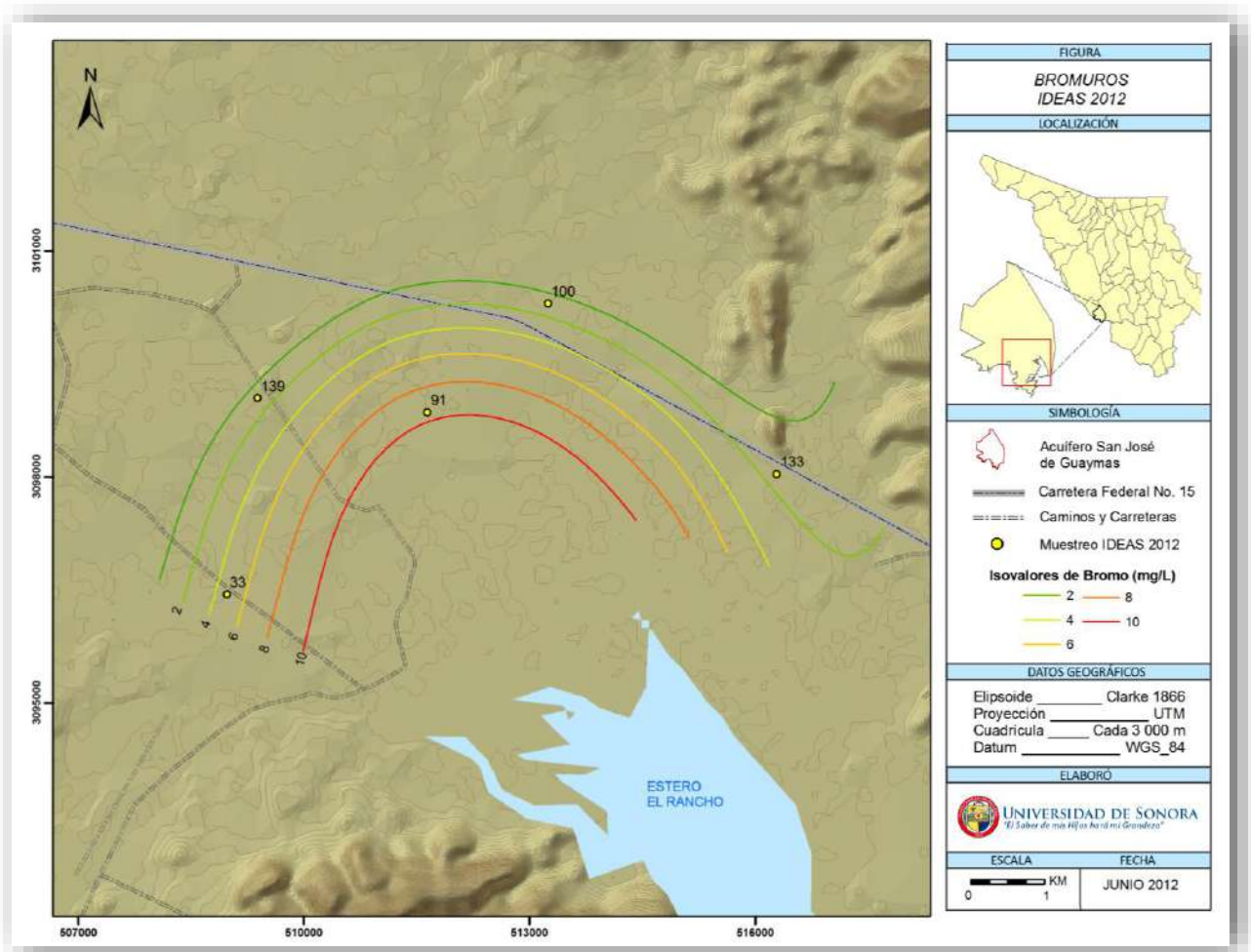


Figura 6.29. Isovalores de Bromuros (CEA, 2012).

6.4.1.8 Sodio

El sodio es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl. Una fuente importante de sodio la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar. Las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, como ocurre en el caso del calcio. La presencia de sodio en aguas naturales es muy variable pudiendo alcanzar hasta 120,000 mg/L en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa 100 ó 150 mg/L en



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



aguas dulces normales. La NOM-127-SSA1-1994 establece un Límite Máximo Permisible de 200 mg/L en agua para uso y consumo humano.

En 2008 las concentraciones más altas se registraron en los pozos 189 (414 mg/L), 91 (414 mg/L), 97 (437 mg/L), 34 (483 mg/L) y 92 (552 mg/L). El contenido de sodio en los pozos de 91, 92, 97 y 189 se asocia a la entrada de agua del estero, la cual se mezcla con el agua del acuífero y afecta a la porción sureste del área de estudio; en el caso del aprovechamiento 34 se asocia a la disolución de rocas evaporíticas, que incrementan la cantidad de sales (Figura 6.30).

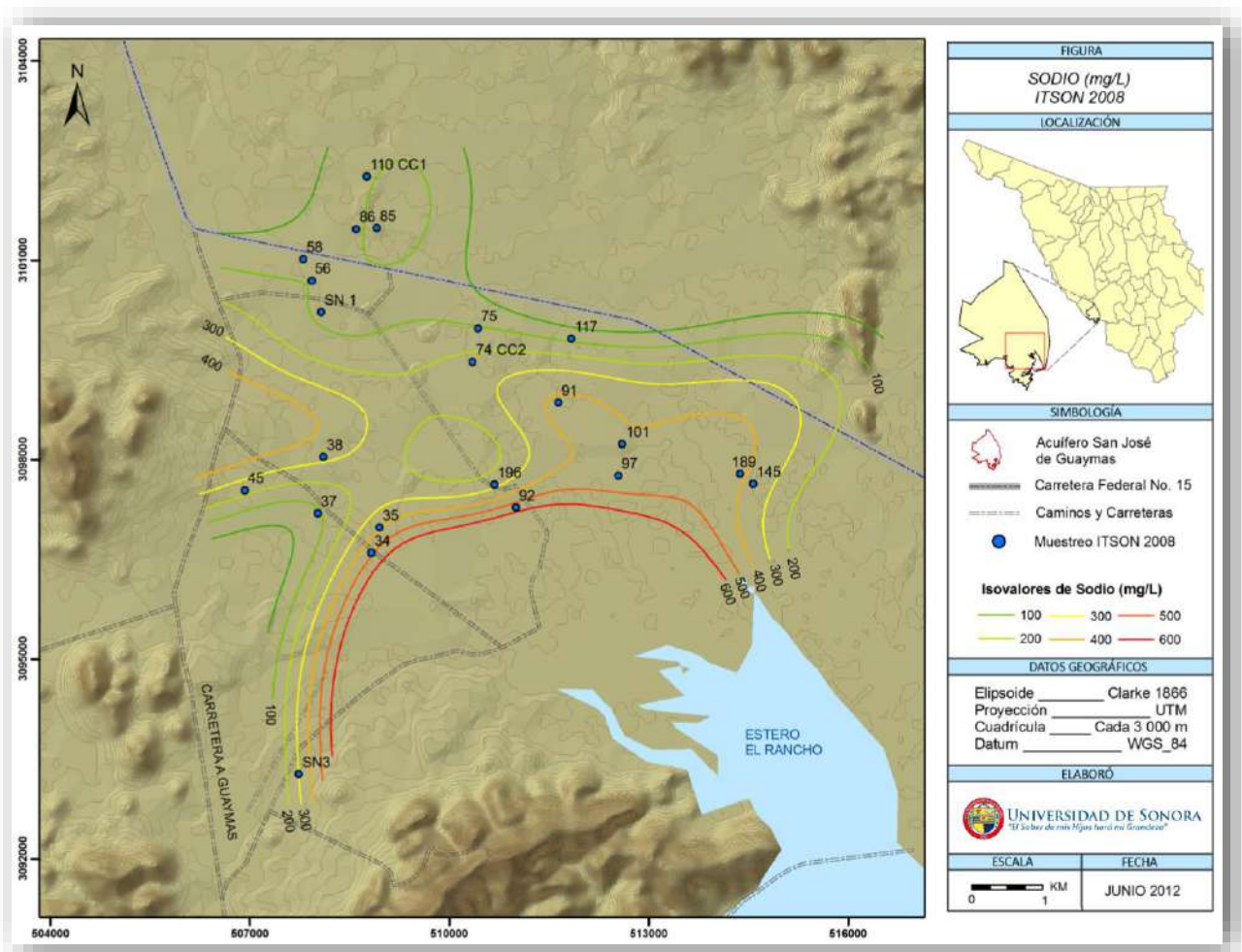


Figura 6.30. Isovalores de Sodio (ITSON, 2008).

En 2009, los valores más altos se presentan en los aprovechamientos 132 (348 mg/L), 2 (548 mg/L), SN-27 (562 mg/L) y 135 (572 mg/L). Para el caso de los pozos 132 y 135, se



asocian estos valores de sodio a la disolución de rocas evaporitas que aportan dicho catión al agua subterránea. El pozo 2 tiene elevado contenido de Na, que se debe a la interacción con la zona de interfase. La noria SN-27 es un aprovechamiento que fue afectado por la precipitación causada por el huracán Jimena, que dada su intensidad y su escurrimiento incorporaron elementos del suelo al agua subterránea de la cual depende, afectando solo de manera temporal su calidad (Figura 6.31).

Del último muestreo (2012) se obtuvieron solo dos valores altos que sobrepasan el límite máximo permisible establecido por la NOM-127-SSA1-1994, estos se presentaron en los pozos 91 (459 mg/L) y 33 (479 mg/L). El aprovechamiento 91 extrae agua afectada por el fenómeno de mezcla, a lo que se adjudica tal valor de sodio; en el caso del pozo 33 (Figura 6.32), este se ve afectado por la disolución de evaporitas que enriquecen en sales el agua subterránea que se extrae.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

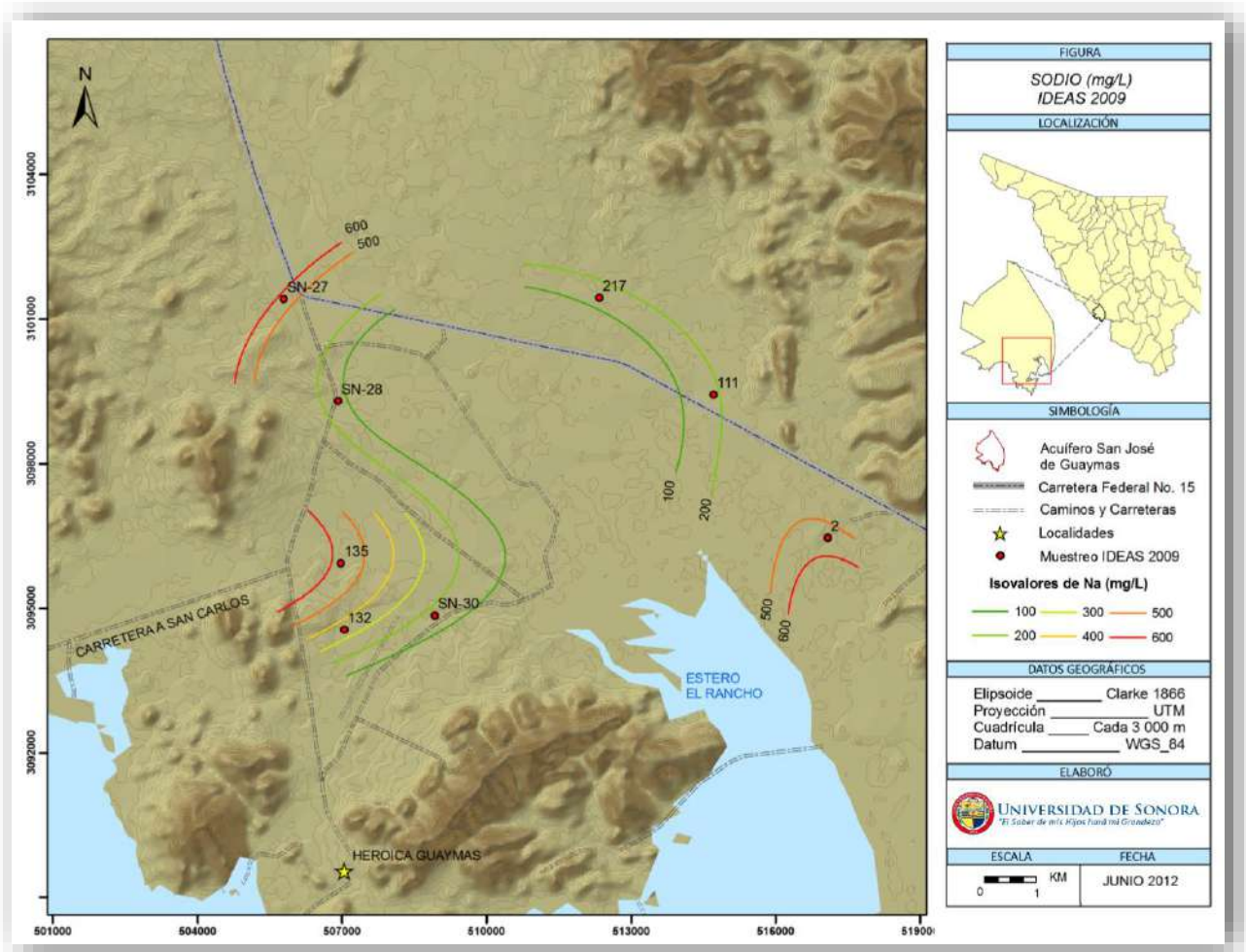


Figura 6.31. Isovalores de Sodio (IDEAS, 2009).

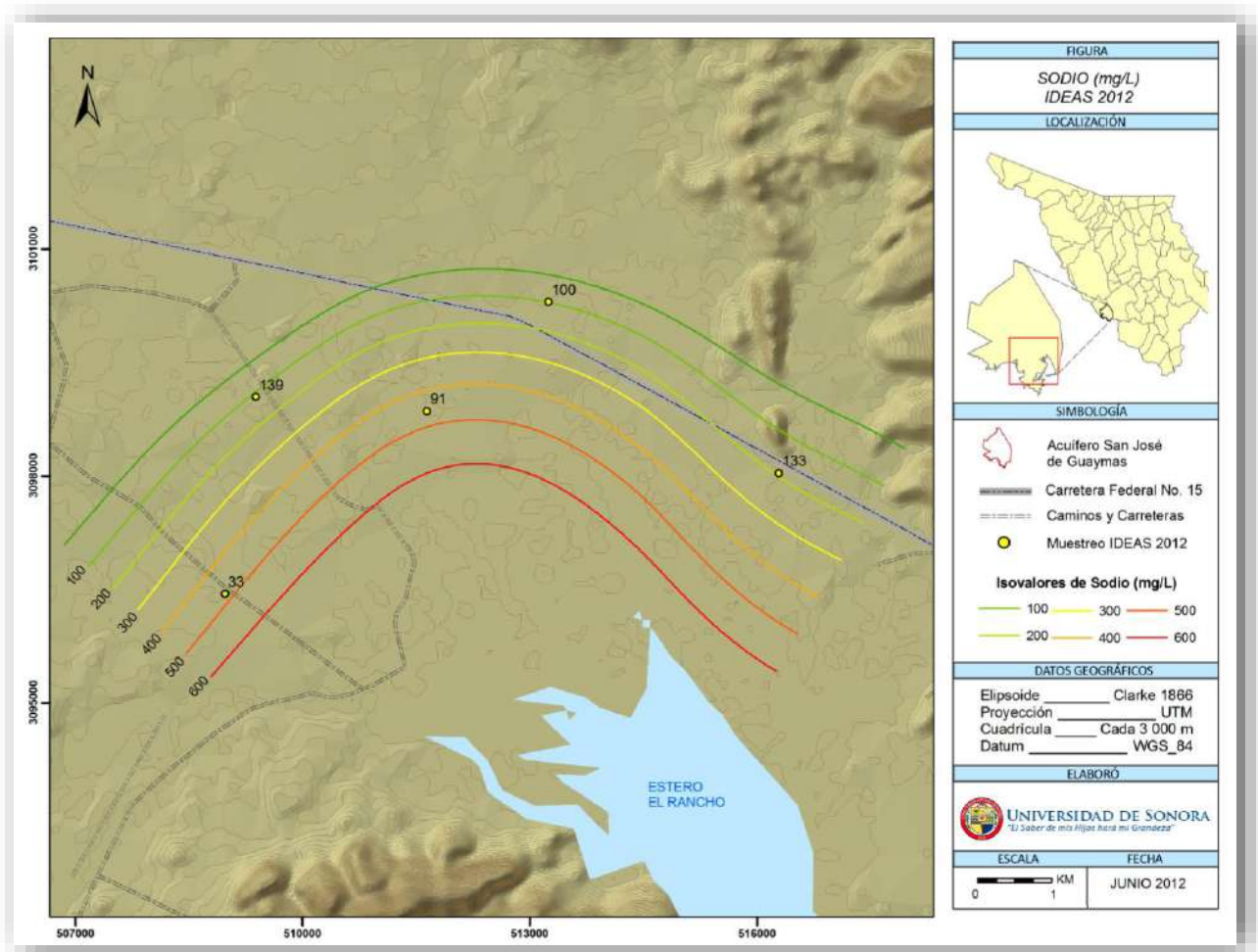


Figura 6.32. Isovalores de Sodio (CEA, 2012).

6.4.1.9 Bicarbonatos

La disolución de calizas y dolomías es una de las fuentes principales de carbonatos y bicarbonatos. La mayoría de las aguas subterráneas naturales con un pH inferior a 8.3, la especie carbonatada dominante es el anión bicarbonato, en estas aguas la concentración suele variar entre 50 y 400 mg/L, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/L. Concentraciones de hasta 1000 mg/L pueden encontrarse en aguas pobres en Ca y Mg o en las que se producen fenómenos de liberación de CO₂ en el acuífero.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



En el 2008 los pozos con los mayores valores de Bicarbonatos en el área de estudio son 74CC2 (298.9 mg/L), 34 (311.1 mg/L), 35 (323.3 mg/L) y 85 (390.4 mg/L), estos valores son indicativos de agua de mayor residencia en el medio que han incorporado este ion, producto de la disolución de evaporitas o rocas carbonatadas (Figura 6.33).

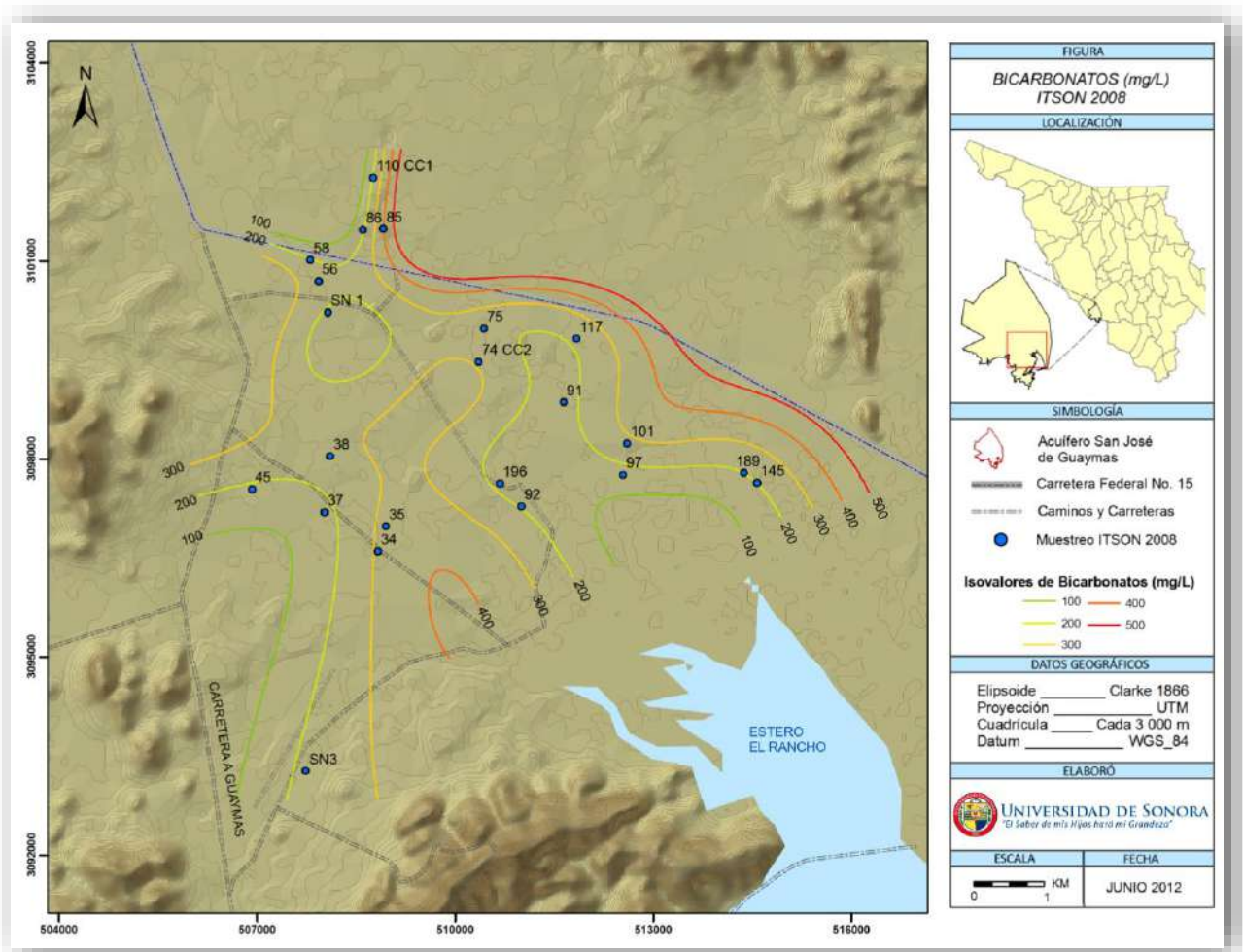


Figura 6.33. Isovalores de Bicarbonatos (ITSON, 2008).

En 2009 los aprovechamientos 111, 217, 135, SN-28 y 2 presentan los valores más altos de HCO_3 . Las concentraciones de los pozos 111 y 217 se asocian a aguas de mayor residencia en un medio compuesto por rocas carbonatadas; en el caso de los aprovechamientos 135 y SN-28, la presencia de bicarbonatos se asocia a los lentes evaporíticos que enriquecen las aguas



subterráneas al entrar en solución. Por último el pozo 2 el cual recibe un aporte de HCO_3 proveniente de la interacción de agua de mar con agua subterránea (Figura 6.34).

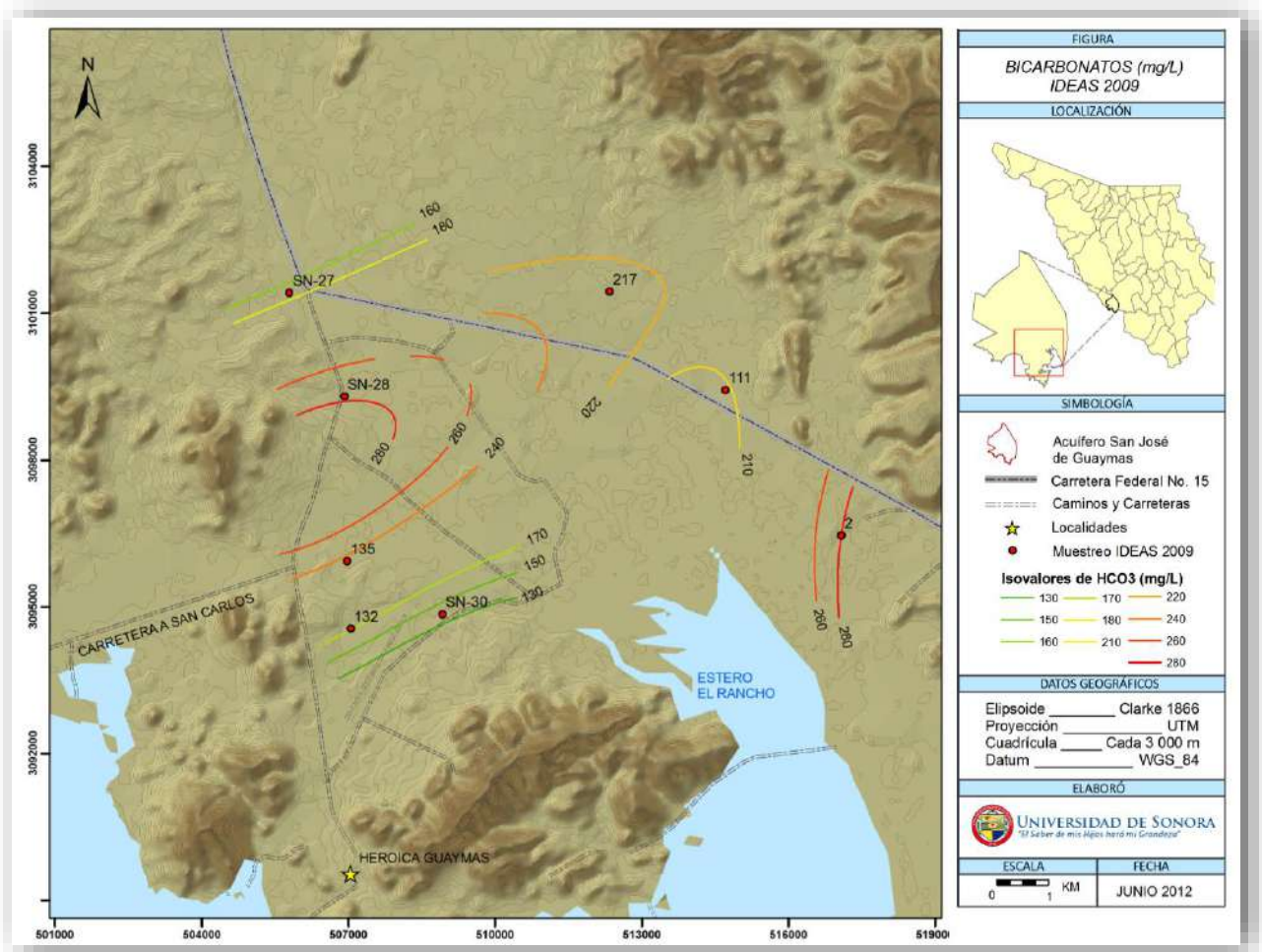


Figura 6.34. Isovalores de Bicarbonatos (IDEAS, 2009).

A partir del muestreo del 2012, los pozos con altas concentraciones son el 33 (300 mg/L) y 139 (235 mg/L) que se encuentran en una zona de presencia de rocas evaporitas que al diluirse en el agua subterránea elevan el contenido de bicarbonato. Con respecto a la NOM-127-SSA1-1994 el agua de estos aprovechamientos se encuentra rebasando el límite máximo permisible (Figura 6.35).

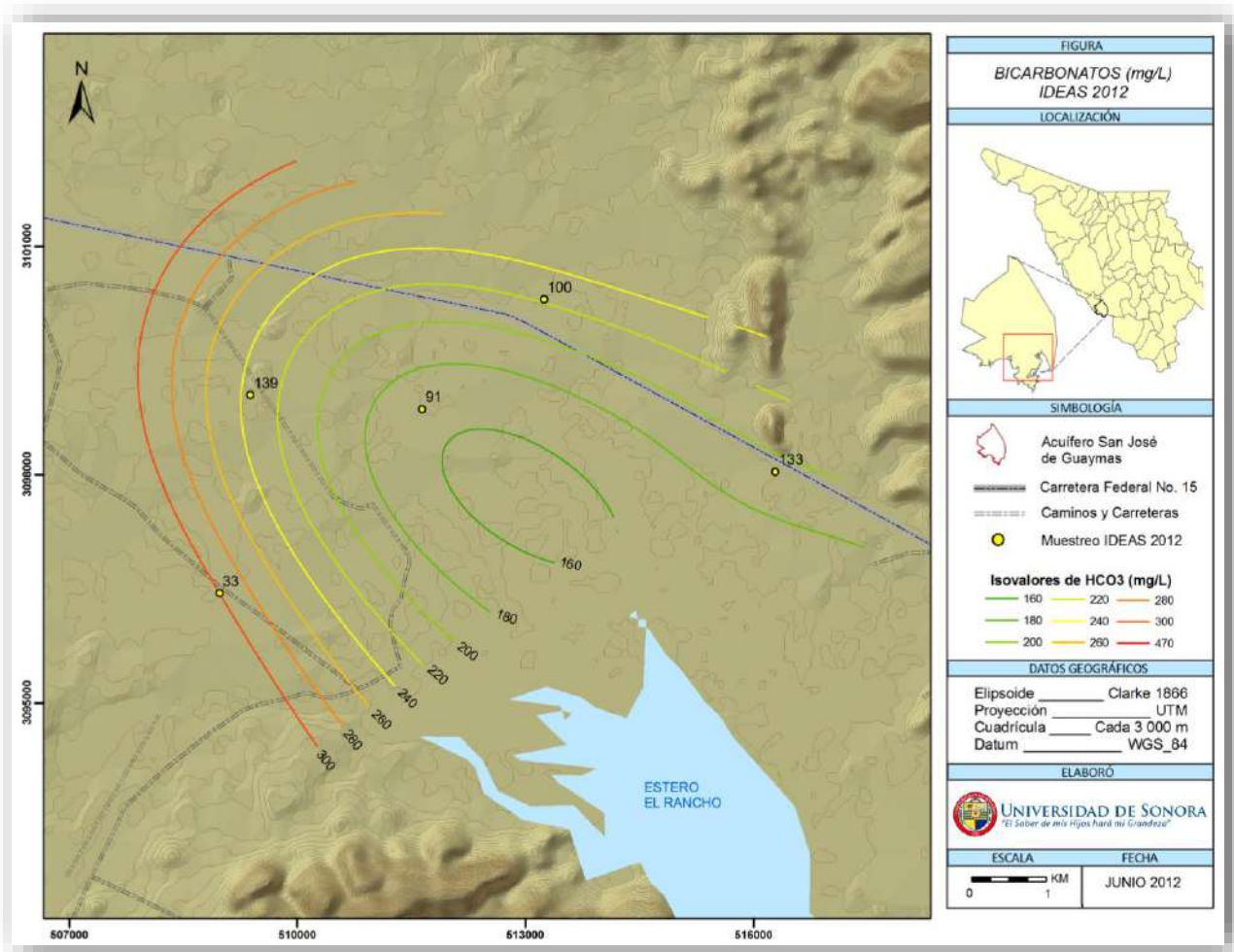


Figura 6.35. Isovalores de Bicarbonatos (CEA, 2012).

6.4.1.10 Calcio.

El Calcio (Ca) suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonatos (calcita, aragonito y dolomita) o sulfatos (yeso y anhidrita).

La concentración de Ca varía ampliamente en las aguas subterráneas. Concentraciones entre 10 y 250 mg/L son frecuentes en aguas dulces mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg/L y en salmueras hasta 50,000 mg/L.



Los datos de 2008 muestran una tendencia de valores altos en la zona continental más cercana al estero, los pozos 92 (640 mg/L), 91 (904 mg/L) y 97 (992 mg/L) se ven afectados por la intrusión salina que es el agua de mar la que da el mayor aporte del catión Ca (Figura 6.36).

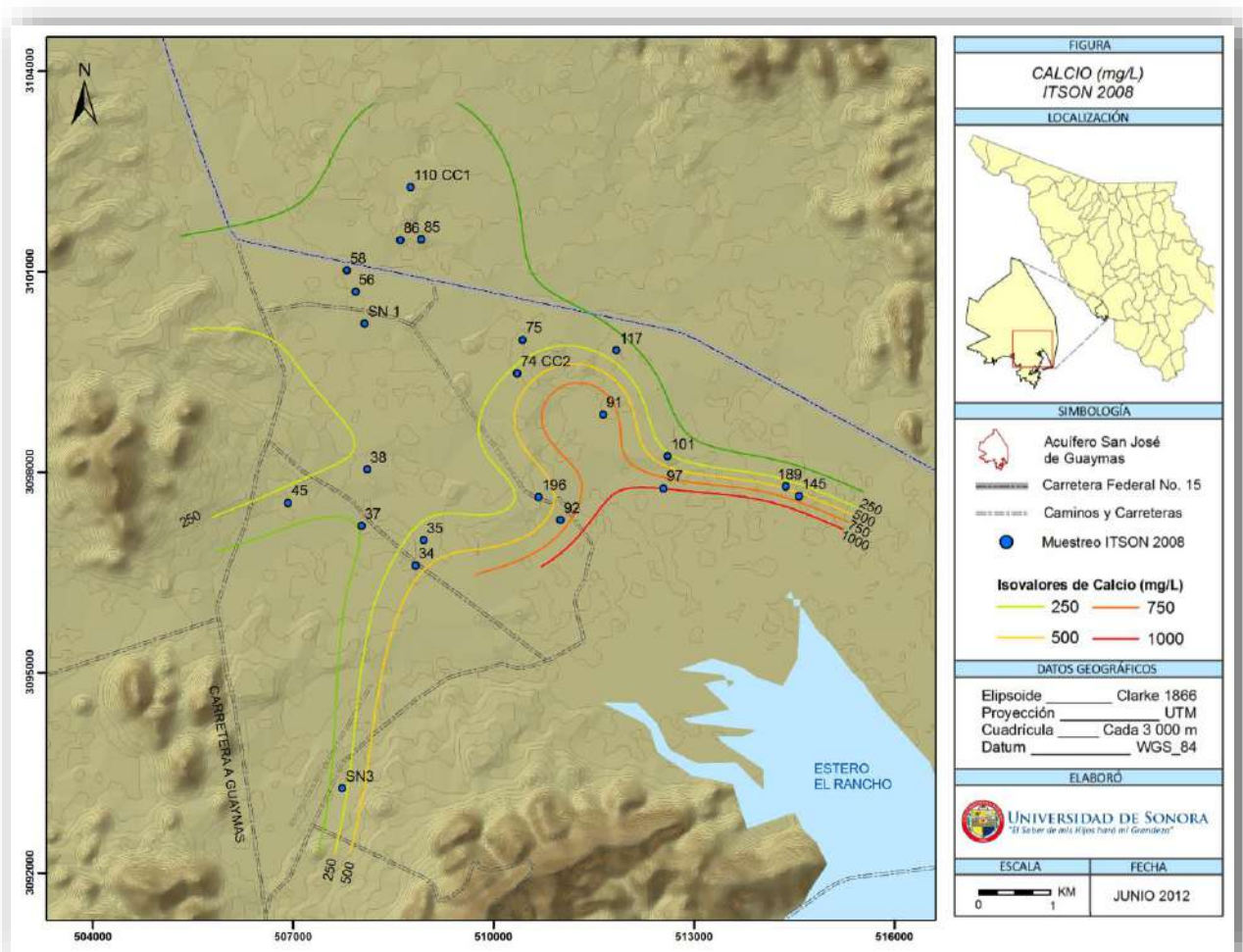


Figura 6.36. Isovalores de Calcio (ITSON, 2008).

En 2009 la noria SN-27 y el pozo 135 tienen valores por arriba de 400 mg/L, asociados a la disolución de rocas carbonatadas del medio; el aprovechamiento 2 también rebasa los 400 mg/L, solo que se asocia dicho valor a la incorporación de calcio proveniente de agua marina, ya que se encuentra en la zona de interfase (Figura 6.37).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



Los valores obtenidos del muestreo de 2012, evidencian que la interacción del agua subterránea con el agua del estero El Rancho está afectando fuertemente al pozo 91 que tiene 1090 mg/L de calcio, que se asocia a la mezcla del agua subterránea con el agua marina (Figura 6.38).

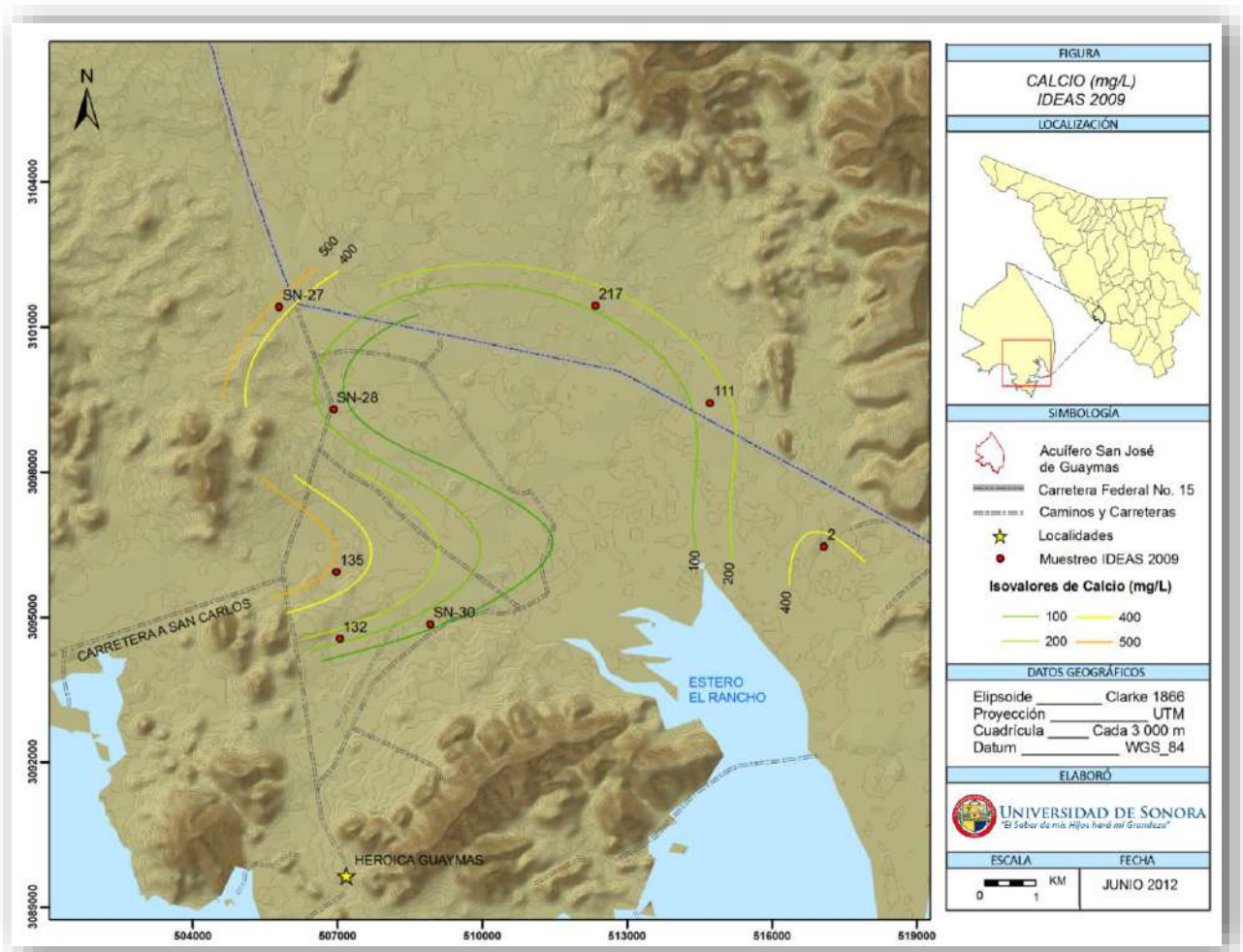


Figura 6.37. Isovalores de Calcio (IDEAS, 2009).



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

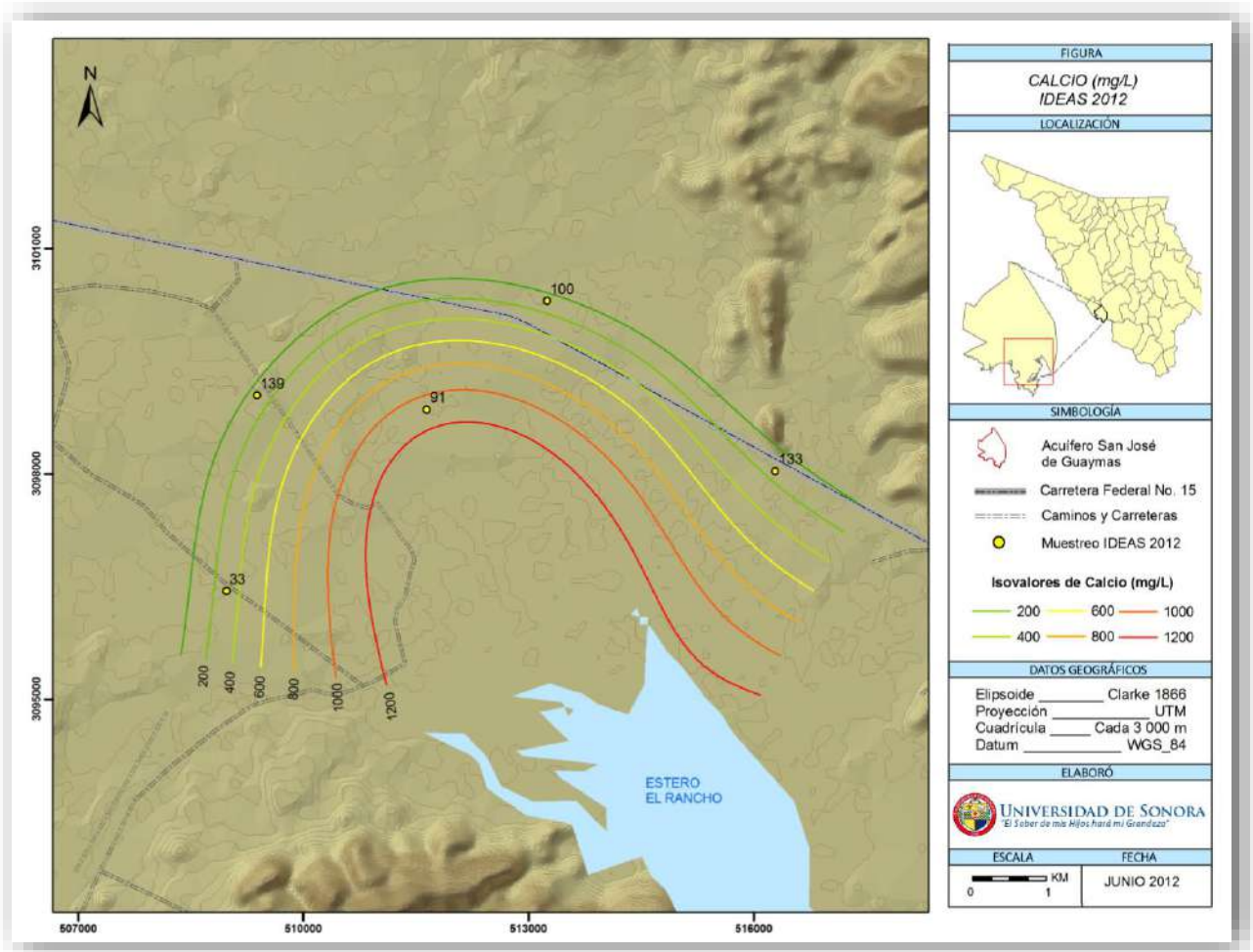


Figura 6.38. Isovalores de Calcio (CEA, 2012).



6.4.2 Caracterización Isotópica de las Aguas.

De acuerdo con los resultados obtenidos del análisis isotópico de diez muestras de agua dentro del acuífero San José de Guaymas, se obtuvieron datos que permiten clasificar a estos aprovechamientos de acuerdo a su relación con agua de recarga o de la zona de interfase. Los datos de Deuterio (^2H) y ^{18}O obtenidos del análisis se muestran en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. Resultados del Análisis Isotópico.

Muestra	$\delta\text{D H}_2\text{O}$	$\delta^{18}\text{O H}_2\text{O}$
P-113	-52.5	-6.98
P-100	-49.7	-6.76
P-91	-46.8	-6.22
P-33	-48.8	-6.52
P-139	-52.9	-7.03
SN-27	-51.6	-6.98
P-135	-48.4	-6.53
P-45	-49.6	-6.76
P-97	-46.2	-6.11
P-217	-49.9	-6.62

Los resultados de isótopos estables se graficaron de acuerdo con la línea meteórica mundial propuesta por el VSMOW.

Conforme a la línea meteórica mundial propuesta por **VSMOW** se ubicaron los valores de isótopos estables obtenidos en las muestras de agua, resultando tres grupos de agua (Figura 6.39).

- **Agua de Recarga:** Se caracteriza por su alto fraccionamiento isotópico, es decir proviene de agua precipitada que se generó en zonas lejanas a la costa. Los aprovechamientos que forman este grupo son la noria SN-27 y el pozo 139 al noroeste del área de estudio y al este el pozo 113.



- **Agua típica del valle:** Los valores de esta agua tienen mayor peso isotópico y provienen de la mezcla del agua del acuífero regional con el agua que se infiltra de manera vertical (agua que antes de infiltrarse se enriquece isotópicamente debido a la evaporación que sufre en la superficie). El grupo se presenta al oeste en los pozos 33, 45 y 135, y en la porción norte por los aprovechamientos 100 y 217.
- **Zona de Interfase:** Dado que el acuífero San José de Guaymas tiene una interacción con el estero "El Rancho", se genera un proceso de mezcla de agua subterránea con agua de mar, que provoca enriquecimiento isotópico dadas las características de esta última. Los pozos 91 y 97 se encuentran cercanos al estero El Rancho y el agua que se extrae de ellos, muestra la mezcla entre el agua de mar con agua subterránea del acuífero que también se puede observar con los datos de hidrogeoquímica.

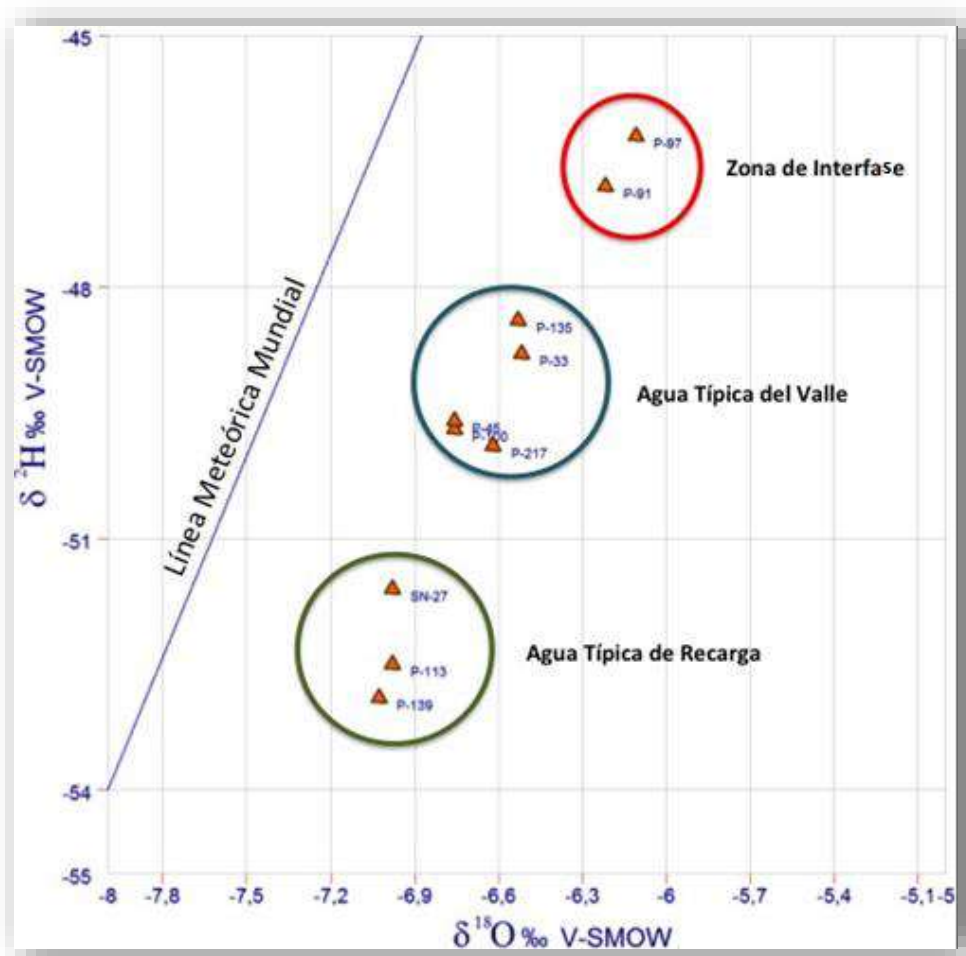


Figura 6.39. Zonificación de Aguas a partir de contenido de ^2H y ^{18}O .



6.5 APLICACIÓN DE ÍNDICES HIDROGEOQUÍMICOS

Las relaciones entre iones ayudan a identificar los procesos que ha sufrido el agua subterránea en su camino. Los índices hidrogeoquímicos no son meras relaciones iónicas, sino que deben tener, además, algún contenido geoquímico. Las características litológicas e hidrogeológicas del acuífero, unido al objetivo que se persigue, aconsejarán, en cada caso, la utilización de aquellos índices que puedan proporcionar la mejor información.

Las relaciones iónicas, son índices hidrogeoquímicos tradicionalmente usados en el estudio del fenómeno de intrusión marina.

Relación Cl/Br

Los iones cloruro (Cl) y bromuro (Br) disueltos en el agua presentan un comportamiento próximo al de trazador ideal (Custodio y Llamas, 1983), debido a su carácter hidrofílico y su pequeño radio iónico. Los procesos de dilución, evaporación y mezcla en el terreno, entre otros, aunque pueden afectar a las concentraciones absolutas, no modifican el valor de su relación. Por el contrario las sales disueltas guardan razonable memoria de la composición de la materia soluble que ha dado lugar al origen de la salinidad, en lo que al Cl y Br se refiere. No toda la salinidad de las aguas subterráneas tiene un origen asociado al aerosol marino, pudiendo existir otros aportes salinos (litológicos, antrópicos, etc.) que contribuyen a la salinidad total.

Las aguas cuya salinidad procede mayormente del aerosol marino presentan una *relación $R = rCl/rBr$ próxima a la marina (655 ± 4)*; con un rango de variación obtenido que puede ser mayor a ± 20 , explicable por imprecisiones analíticas y por efecto del agua dulce de dilución para las aguas menos salinas. El valor de R no se ve afectado por procesos moderados de evaporación, pero sí por la adición antrópica de ClNa de origen diverso o la presencia natural de diversas sales. La modificación del valor de R del agua de lluvia por aporte antrópico de sustancias halogenadas a la atmósfera modifica el valor de R de la deposición atmosférica y posteriormente el valor de R del agua de recarga observada en el acuífero.



Los resultados del muestreo del 2008 de 22 muestras de agua subterránea fueron interpretados para obtener la relación rCl/rBr , de los cuales 11 muestras se encuentran entre los valores de 80 y 389, siendo estos valores de agua dulce, 9 muestras presentan valores entre 428 a 670, los cuales pertenecen al tipo de agua mezcla y 2 muestras presentan valores índices que superan los 700, los cuales son de agua de agua salobre (Tabla 6.9). En la figura 6.40 se muestran los valores de la relación de Cl/Br contra los sólidos totales disueltos (STD).

Tabla 6.9. Relaciones de rCl/rBr de 2008.

POZO	COORDENADAS		rCl/rBr
	X	Y	
110 CC1	508754	3102260	81.1143449
58	507804	3101015	116.337404
85	508910	3101483	194.586751
86	508601	3101470	84.9460842
SN 1	508071	3191292	344.857304
56	507932	3100694	290.009101
75	510433	3099976	280.24622
74 CC2	510349	3099473	478.52054
92	511000	3097282	587.91798
196	510673	3097625	463.684771
91	506448	3091275	732.056555
117	511838	3099818	126.382767
101	512603	3098235	528.722165
97	512542	3097759	729.295151
34	508827	3096601	551.674001
35	508952	3096981	428.541043
38	508105	3098042	388.906971
SN3	507734	3093270	670.846922
37	508021	3097193	104.956571
45	506922	3097540	349.753561
189	514376	3097784	568.681185
145	514569	3097639	618.923724

Agua dulce

Agua mezcla

Agua salobre

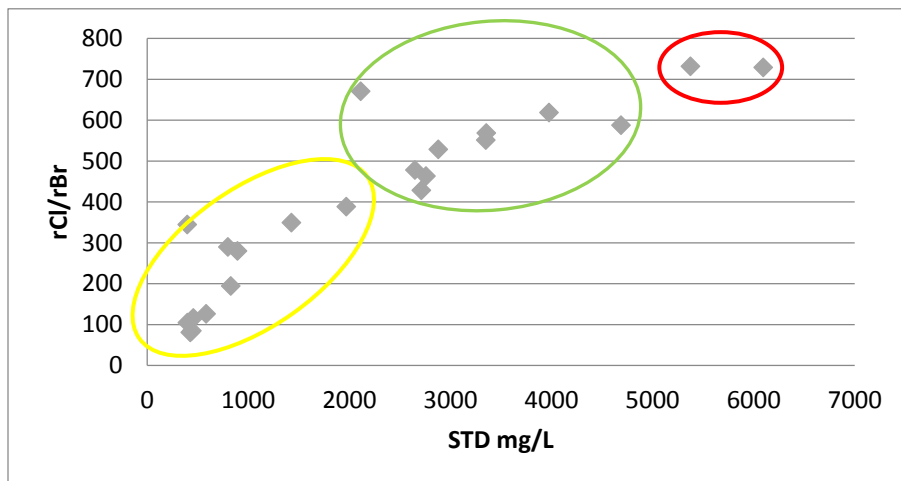


Figura 6.40. Relaciones de rCl/rBr (2008).

Para el año de 2009 se interpretaron los resultados de 8 muestras de agua subterránea, en 3 muestras se presentan índices de 0 a 290, los cuales corresponden a un agua de tipo dulce, en 4 muestras de acuerdo a la relación rCl/rBr , es una agua de mezcla y solo una muestra (pozo SN-30) presenta una relación de 780, la cual se clasifica como un agua de tipo salobre, pero debido a depósitos evaporíticos y no por intrusión de agua de mar (Tabla 6.10). En la figura 6.41 se muestra la gráfica del año de 2009 de rCl/rBr contra sólidos totales disueltos.

Tabla 6.10. Relaciones de rCl/rBr de 2009.

POZO	COORDENADAS		rCl/rBr
	X	Y	
SN-27	505792	3101413	621.532394
132	507045	3094547	504.126183
135	506976	3095928	438.578293
SN-28	506916	3099293	0.0
SN-30	508925	3094846	780.283192
2	517079	3096456	403.240813
111	514712	3099427	290.482785
217	512340	3101436	132.815828

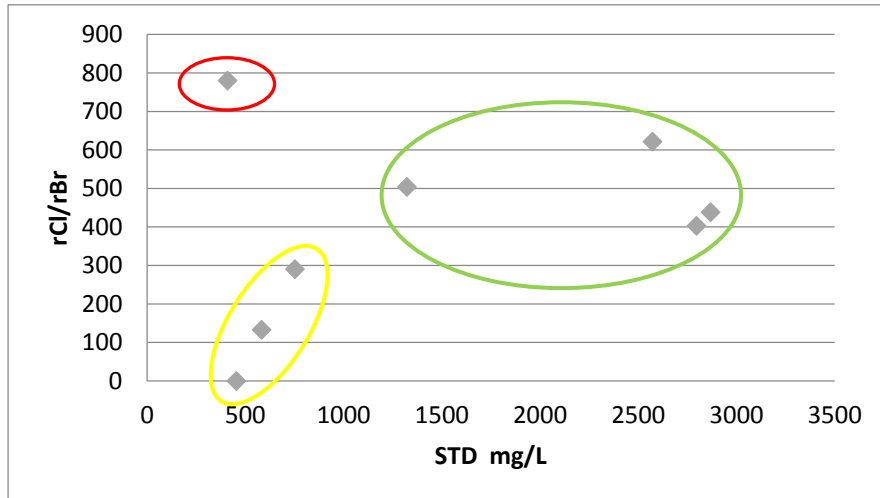


Figura 6.41 Relaciones de rCl/rBr (2009).

En 2012 se realizó el análisis de 5 muestras de agua subterránea, de las cuales 3 muestras presentan una relación de rCl/rBr con valores entre 342 a 367, que se clasifica como una agua tipo dulce, una muestra (P-33) presenta una relación de rCl/rBr con valor de 557.98 la cual pertenece a una agua tipo mezcla, el aprovechamiento 91 es el que presenta una relación de rCl/rBr con valor de 727.33 que es perteneciente al tipo de agua salobre (Tabla 6.11). En la figura 6.42 se observan los datos del año de 2012 de las relaciones de Cl/Br contra STD.

Tabla 6.11. Relaciones de rCl/rBr de 2012.

POZO	COORDENADAS		rCl/rBr
	X	Y	
P-113	516291.008	3098039.000	342.107042
P-100	513245.709	3100302.435	367.615023
P-91	511642.996	3098860.485	727.332839
P-33	508972.142	3096438.012	557.987089
P-139	509378.865	3099045.382	365.114241

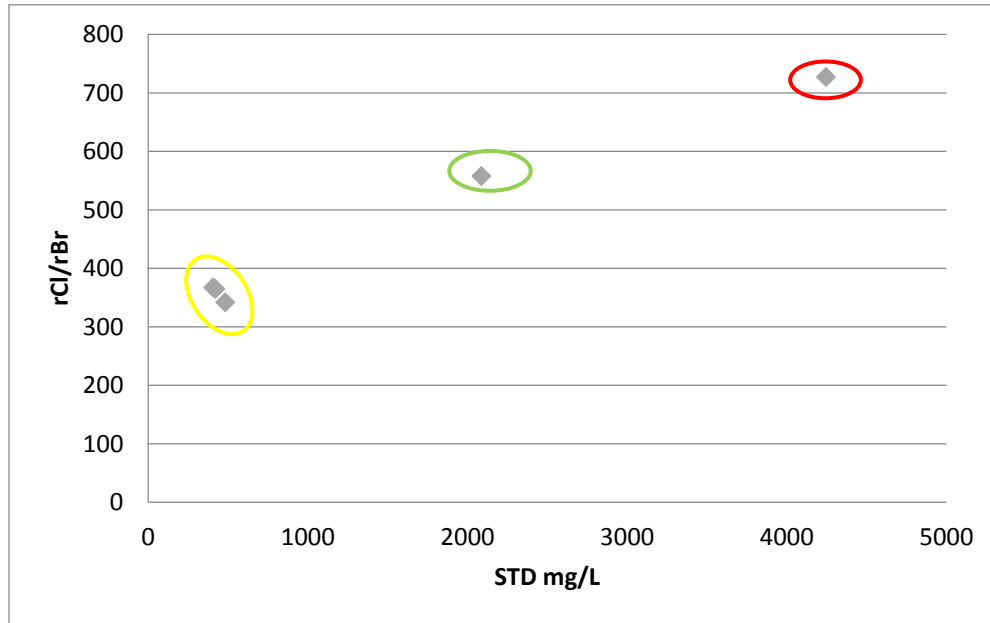


Figura 6.42. Relaciones de rCl/rBr (2012).

Relación Cl/HCO₃

Es el índice de mayor uso, su rápido aumento es un excelente indicador de la intrusión salina, dado que el cloruro es el anión que predomina en el agua del océano y normalmente se encuentra en pequeñas cantidades en el agua subterránea. En cambio, el bicarbonato es por lo general el anión más abundante en el agua subterránea y sólo se encuentra en pequeñas cantidades en el agua de mar, debido a que en este ambiente se consume rápidamente y se deposita en el fondo marino en forma de calcio.

Lo que más delata el comienzo o establecimiento de un estado de intrusión salina es una rápida elevación en el contenido del anión cloruro, ya que aguas muy cloruradas por contaminación humana o por riegos insistentes son también muy carbonatadas. La relación cloruro–bicarbonato, $rCl^-/rHCO_3^-$, se presenta normalmente en aguas continentales con valores entre 0.1 y 5 y en el agua de mar varía entre 20 y 50 (Custodio y Llamas, 1996).

Los datos recopilados de 30 muestras de agua que realizó la Universidad de Sonora (UNISON) en 1998 fueron interpretados, de las cuales 23 muestras se determinó que la relación



de Cl/HCO_3 se encuentra entre 0.33 a 4.47 la cual se clasifica como una agua de tipo dulce, mientras que 4 muestras con obtuvieron índices de rCl/rHCO_3 entre 5.26 a 11.75 corresponden a agua mezcla y 3 muestras restantes presentan índices de rCl/rHCO_3 entre 12.14 a 15, la cual se clasifica como agua salobre (Figura 6.43 y Tabla 6.12).

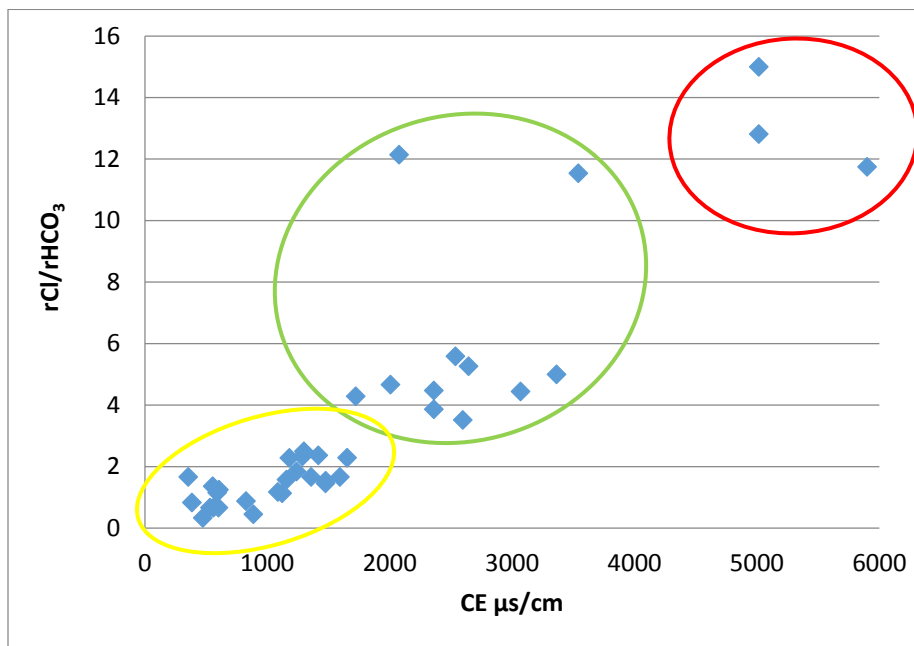


Figura 6.43. Relaciones de rCl/rHCO_3 (1998).

Tabla 6.12. Relaciones de rCl/rHCO_3 (1998).

POZO	COORDENADAS		rCl/rHCO_3
	X	Y	
3	500409.69	3096740.88	5.58823529
4	508577.867	3094466.9	11.5384615
23	511253.106	3096530.75	12.1428571
34	508876.819	3096559.53	4.44444444
37	508193.566	3097174.46	0.33333333
45	506991.61	3097573.72	2.33333333
51	509286.352	3096775.24	1.53846154
59	509942.497	3096006.49	15.00
66	502512.616	3097541.18	1.45833333
67	510841.041	3099145.9	3.86363636



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.



71	510131.36	3098776.03	1.84210526
74	510349.162	3099545.49	3.51851852
75	510539.442	3100530.33	1.57894737
76	511058.762	3099946.15	2.28571429
77	511578.044	3099454.3	2.36842105
83	508901.3	3100375.15	2.50
84	512916.273	3099271.04	4.47368421
85	508053.823	3101913.1	0.66666667
91	511415.229	3098377.16	5.00
92	511088.514	3097299.87	12.8125
102	512724.993	3099393.92	2.29166667
105	512696.414	3100593.96	1.13636364
110	509145.75	3102067.74	0.66666667
137	506771.471	3100496.84	0.88235294
139	509201.958	3099975.35	1.17647059
146	511522.869	3100038.9	11.75
215	510596.932	3097268.66	5.26315789
S/N 01	507883.887	3102928.43	1.36363636
S/N 02	508046.81	3100159.15	1.25
S/N 03	509161.065	3096313.58	4.28571429

En el año 2008 se interpretaron los resultados de 22 muestras de agua, en 11 muestras se obtuvo un índice de $rCl/rHCO_3$ entre 0.35 a 4.49 la cual pertenece al tipo de agua dulce, en 6 muestras el índice de $rCl/rHCO_3$ fue de 5.26 a 10.56, que se clasifica como una agua de mezcla y en 5 muestras el índice obtenido se encuentra entre 12.83 a 36.29, la cual corresponde a una agua tipo salobre (Tabla 6.13). En la figura 6.44 se presentan los datos del 2008 de $rCl/rHCO_3$ contra sólidos totales disueltos (STD).



Tabla 6.13. Relaciones de $rCl/rHCO_3$ de 2008.

POZO	COORDENADAS		$rCl/rHCO_3$
	X	Y	
110 CC1	508754	3102260	0.47473074
58	507804	3101015	0.35542668
85	508910	3101483	0.58978873
86	508601	3101470	0.60699682
SN 1	508071	3191292	0.38982281
56	507932	3100694	1.16477904
75	510433	3099976	1.51690141
74 CC2	510349	3099473	5.26760563
92	511000	3097282	17.9806338
196	510673	3097625	10.5615023
91	506448	3091275	25.8319249
117	511838	3099818	0.82159624
101	512603	3098235	7.5286385
97	512542	3097759	36.2979415
34	508827	3096601	7.48632974
35	508952	3096981	5.65665692
38	508105	3098042	4.36939821
SN3	507734	3093270	6.08685446
37	508021	3097193	0.41670714
45	506922	3097540	4.49389671
189	514376	3097784	12.8322663
145	514569	3097639	15.5620999

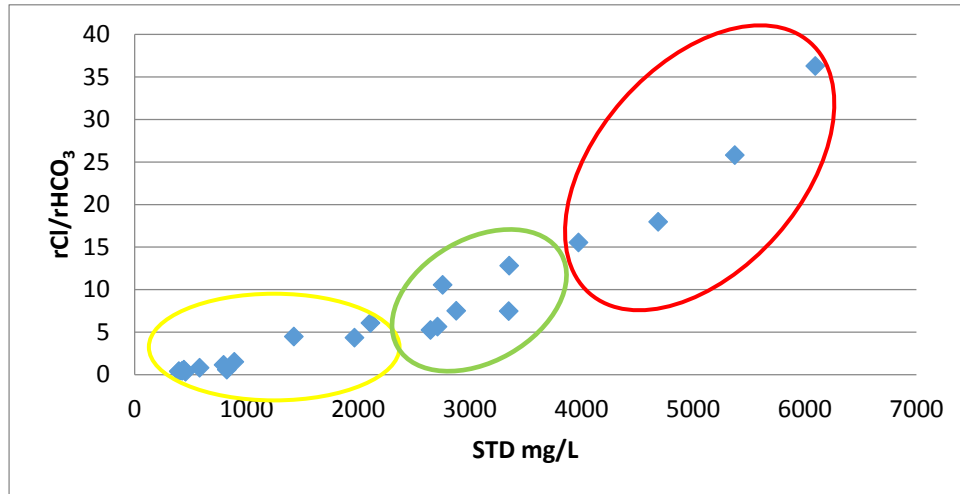


Figura 6.44. Relaciones de rCl/rHCO₃ (2008).

En 2009 los resultados de la relación Cl/HCO₃ de 8 muestras, indica que en 4 muestras se tiene un índice entre 0.6 a 2.8, que corresponde a una agua dulce y en 4 muestras el índice varía entre 7.13 a 11.62, siendo esta un agua de tipo mezcla (Tabla 6.14), en la figura 6.45 se muestra el comportamiento de los datos de relaciones con STD.

Tabla 6.14. Relaciones de rCl/rHCO₃ (2009).

POZO	COORDENADAS		rCl/rHCO ₃
	X	Y	
SN-27	505792	3101413	9.71044874
132	507045	3094547	7.13450292
135	506976	3095928	11.6260114
SN-28	506916	3099293	0.67990678
SN-30	508925	3094846	1.92846286
2	517079	3096456	10.1257545
111	514712	3099427	2.81177977
217	512340	3101436	1.71830986

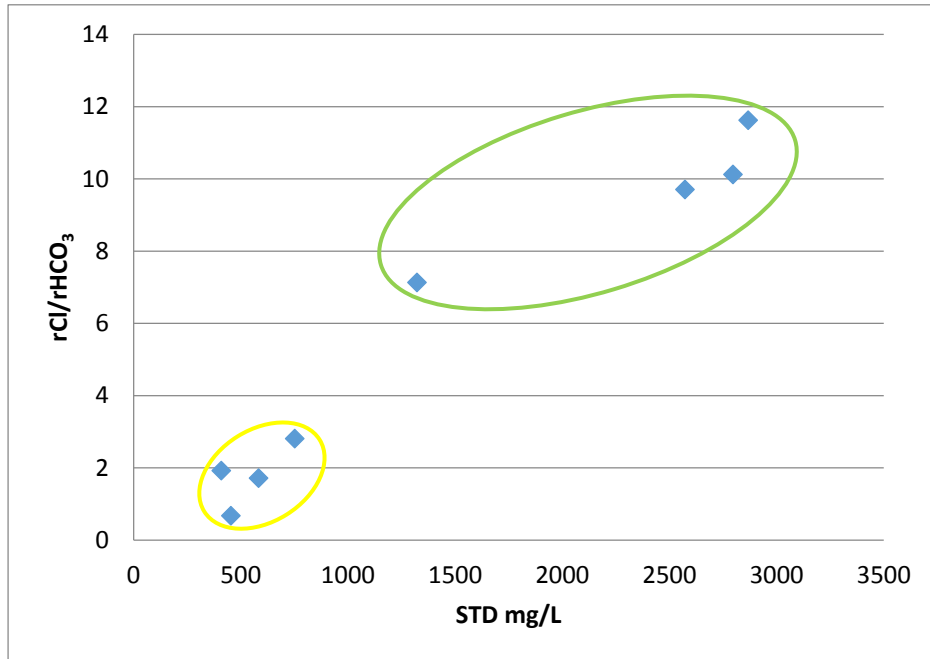


Figura 6.45. Relaciones de $rCl/rHCO_3$ de 2009.

Para el año 2012 los datos de 6 muestras de agua subterránea, indican que en 3 muestras se obtuvieron índices entre 1.06 a 2.01, las cuales pertenecen al tipo de agua dulce, una muestra presento un índice de 6.8 que es una agua tipo mezcla y una muestra presento un índice de 31.4, la cual pertenece a una agua tipo salobre (Tabla 6.15). En la figura 6.46 se muestran los datos de las relaciones de Cl/HCO_3 contra sólidos totales disueltos.

Tabla 6.15 Relaciones de $rCl/rHCO_3$ de 2012.

POZO	COORDENADAS		$rCl/rHCO_3$
	X	Y	
P-113	516291.008	3098039.000	2.01945695
P-100	513245.709	3100302.435	1.13779977
P-91	511642.996	3098860.485	31.4000671
P-33	508972.142	3096438.012	6.81596244
P-139	509378.865	3099045.382	1.0675457



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

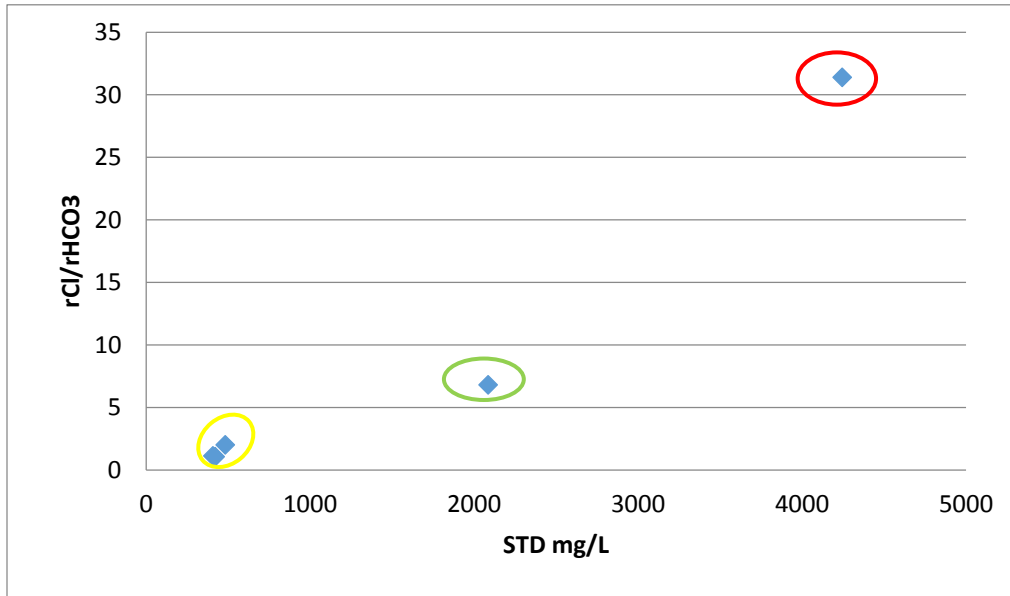


Figura 6.46. Relaciones de rCl/rHCO₃ de 2012.



7. MODELOS CONCEPTUALES

7.1 MODELO DE LA ZONA DE INTERFASE

En el presente apartado se describe el comportamiento hidrodinámico de la zona de interfase, así como otras condiciones acuíferas de importancia dentro del área de estudio de tesis (Figura 7.1).

La zona de interfase se presenta en el subsuelo hacia el sureste del área estudiada, identificando una diferenciación dentro de ésta. Una porción con mayor salinidad que se extiende de manera somera a una elevación no mayor a -50 msnm, la cual representa el contacto directo con las aguas marinas del estero, y la influencia de eventos climáticos extraordinarios que afectan las condiciones físicas naturales, adentrándose al acuífero en forma de una cuña que pierde espesor hacia el pozo PCG-33. Más profunda y potente que la anterior, se tiene la porción con menor salinidad de esta zona de interfase, donde las condiciones resistivas sugieren una zona saturada de agua salobre, evidenciando un intercambio entre el agua dulce del acuífero con el agua salada proveniente del estero. Es importante hacer notar que ésta última porción no se extiende en el subsuelo más allá de la porción más salina, y además, la línea que delimita a la interfase presenta una pendiente hacia la zona del estero El Rancho.

En la zona suroeste del área estudiada se aprecia claramente un paquete delgado de sedimentos arcillosos, el cual se extiende en gran parte de esta porción del acuífero a una elevación de -30 msnm. Este elemento se encuentra separando un acuífero libre somero dentro de sedimentos areno-gravosos, de otro con condiciones de semi-confinamiento de mayor espesor y con mejores probabilidades de almacenamiento de agua subterránea. Este mismo paquete de arcillas puede estar definiendo, en cierta medida, la diferencia de salinidades dentro de la zona de interfase, toda vez que se identifica dentro de esta zona.

El acuífero semiconfinado presenta un mayor volumen hacia el centro del área, donde se observa una litología de sedimentos gruesos, mayormente gravas, que se interpreta como un paleocauce sepultado, y que actúa como una barrera para la zona de interfase con menor salinidad. Igualmente, dentro de este acuífero semiconfinado se presentan lentes de arcilla verde-azul, que por su resistividad y las características de agua de mala calidad en pozos en esta zona, indican el desarrollo de zonas evaporíticas.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

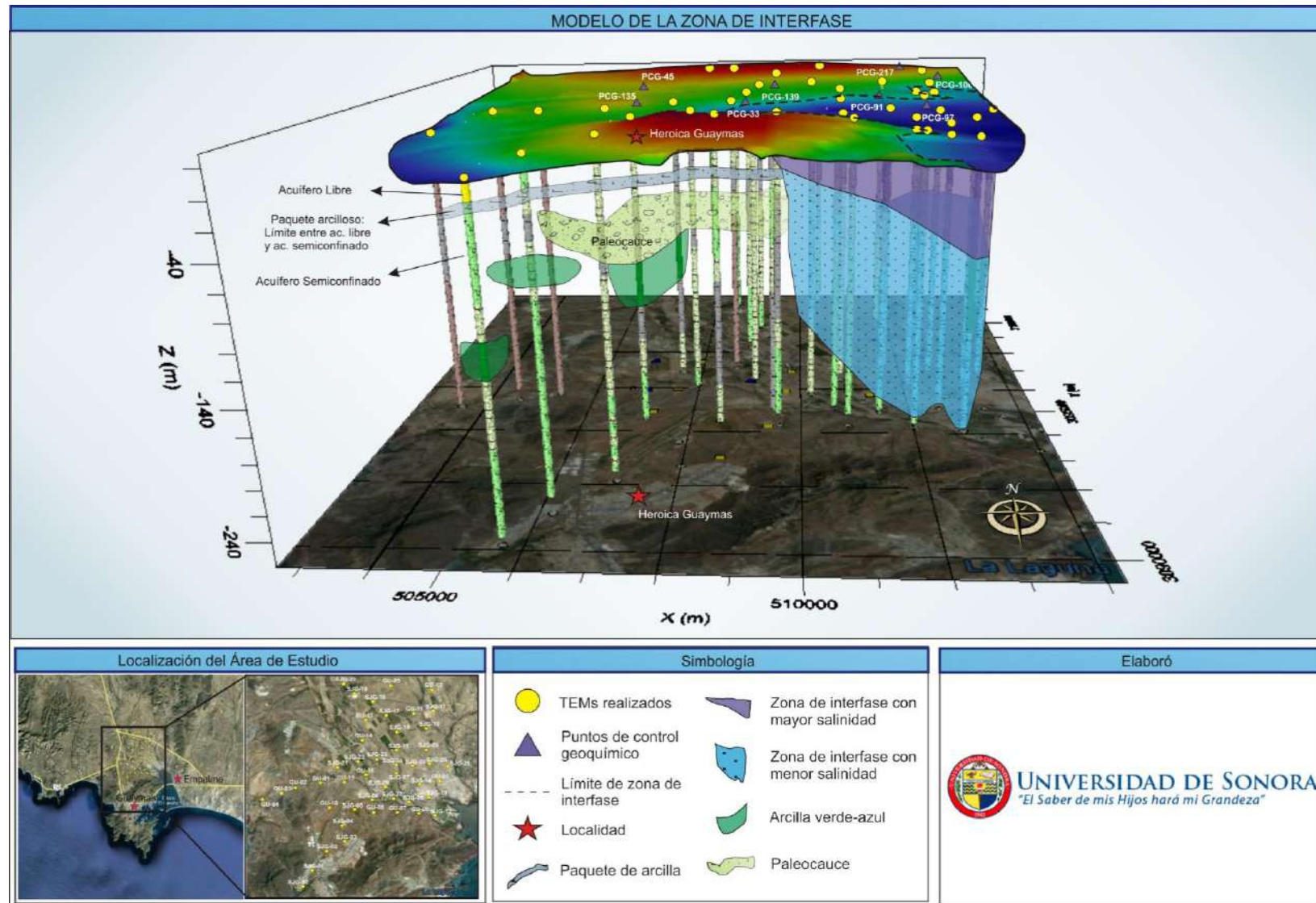


Figura 7.1. Modelo de la Zona de Interfase para la región estudiada (CEA, 2012).



7.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO

7.2.1 Unidades Hidrogeológicas

Con base en la descripción de las unidades litoestratigráficas identificadas en la geología superficial, y en la interpretación geológica realizada a partir de las características resistivas de los materiales en el subsuelo que se tienen en los TEM, en la porción sur del acuífero se determinaron tres unidades hidrogeológicas, considerando a su vez, las condiciones estructurales e hidráulicas de cada una.

Unidad I. Esta unidad representa el relleno sedimentario de fosas estructurales, los cuales fueron depositados dentro de sistemas fluviales costeros, con el desarrollo de algunos depósitos marinos de baja energía. Las características resistivas de los materiales que componen esta unidad son variadas y pueden corresponder a diferencias granulométricas y/o diferencias en saturación y calidad de agua, lo que permite diferenciar varias subdivisiones de ésta:

Unidad Ia. Suelo aluvial: dentro de esta unidad están comprendidas las capas superficiales aluviales recientes. Este sedimento se caracteriza por valores de resistividad muy variados, desde 5 y hasta 200 Ohm/m, lo que refleja un incipiente grado de consolidación y una variación granulométrica en su constitución. La unidad es considerada como receptora y transmisora pero con bajo potencial de almacenamiento.

Unidad Ib. Arcilla a arena fina: corresponden a depósitos finos de planicies de inundación de los canales fluviales, y presentan resistividades bajas entre 2 y 10 Ohm/m. Puede llegar a alcanzar un espesor máximo de 75 m

Unidad Ic. Arena y grava: los valores de resistividad de esta unidad se encuentran comprendidos en un rango de 10 a 25 Ohm/m, y se interpreta que corresponden a los depósitos de arenas y gravas que constituyen el relleno aluvial del área estudiada; su espesor promedio es de 80 m. Las características granulométricas y de consolidación permiten estimar que la unidad tiene propiedades de almacenamiento óptimas para considerarla como la unidad acuífera principal. Es



importante mencionar que hacia las cercanías del estero El Rancho, esta unidad presenta valores relativamente bajos de resistividad (5-12 Ohm/m), interpretándose como sedimentos que contienen agua salobre.

Unidad Id. Gravas y boleos: Representan los sedimentos más gruesos del sistema fluvial, asociados a depósitos coluviales y/o de canal, ya que los valores resistivos que presenta varían entre 25 y 45 Ohm/m. Por lo general, se tiene en la porción basal de este relleno sedimentario, y localmente a manera de lentes dentro de la unidad Ic. Las condiciones de depósito sugieren que esta unidad puede presentar propiedades de almacenamiento importantes y actúe como parte de un acuífero confinado.

Unidad Ie. Arcilla. Esta unidad representa los depósitos finos de ambientes probablemente lagunares con conexión al mar, ya que en las descripciones litológicas de pozos se les reconoce fauna marina. No tiene grandes extensiones y aparece con resistividades menores a los 2 Ohm/m por debajo de una elevación de -75 msnm.

Unidad If. Arcillas evaporíticas. Esta unidad no fue identificada como parte del estudio de resistividad, interpretándose a partir de los resultados de la geoquímica del agua subterránea. Se propone como cuerpos lenticulares locales que corresponden a depósitos lagunares sobresaturados de agua salada.

Unidad II. Esta unidad representa el basamento rocoso volcánico del acuífero, el cual solo localmente se identifica en el subsuelo con el trabajo de resistividad realizado durante este estudio, con valores superiores a los 45 Ohm/m, pero es claramente definido a partir del modelado gravimétrico integrado. Los afloramientos superficiales identificaron dos subdivisiones para esta unidad:

Unidad IIa. Basalto: Esta roca volcánica máfica subyace a la unidad I, y cubre a la unidad IIb. Su emplazamiento es controlado por estructuras regionales y aunque su grado de fracturamiento es importante, éste no presenta un espesor muy considerable, por lo que se considera de bajo potencial hidrogeológico.



Unidad IIb. Roca volcánica félsica: La unidad está constituida por riolitas y tobas riolíticas del Mioceno, y en el trabajo previo fue identificado por un amplio rango de valores resistivos (de 60 a 200 Ohm/m). Dado que su grado de fracturamiento y fallamiento varía de bajo a moderado, se considera que su potencial para formar acuíferos es mínimo, y solo localmente pudiera actual como tal a partir de una concentración del fracturamiento a profundidad.

Unidad III. Roca intrusiva félsica: Esta unidad corresponde con cuerpos plutónicos de una composición que varía de granito a granodiorita. Aunque no fue detectada en los perfiles de resistividad dada su gran profundidad de ocurrencia (> 500 m), su presencia se puede establecer a partir de la geología regional y los resultados de gravimetría. Su baja permeabilidad, profundidad y posibilidades hidrogeológicas bajas, permiten considerarlo como basamento impermeable.

7.2.2 Modelo Hidrogeológico

El modelo conceptual hidrogeológico es una simplificación esquemática, en la que se intenta representar las condiciones hidrogeológicas reales en la cuenca que condicionan el funcionamiento del sistema acuífero, presentándose entonces como un modelo más acorde a la realidad. Para el caso de la porción sur del acuífero San José de Guaymas, este modelo se llevó a cabo a partir de integrar la información geológica, geomorfológica, climatológica, hidrogeológica y geofísica obtenida y reinterpretada en el presente trabajo (Figura 7.2).

El acuífero San José de Guaymas se localiza en una región donde el régimen pluvial presenta dos períodos de ocurrencia, uno de julio a septiembre correspondiente a la temporada de verano que es cuando se registran los valores más altos de lluvia, con una precipitación media de 280.9 mm anuales; y el otro de precipitaciones invernales que abarca de diciembre a febrero, con precipitaciones menos significativas, del orden de los 24.1 mm, provocadas por los frentes fríos que afectan la región.



**Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.**



Durante el mes de septiembre de 2009 se presentó un evento extremo ocasionado por el paso del huracán "Jimena", que originó una importante entrada de humedad y desarrollo de inestabilidad con tormentas intensas hacia los estados costeros del Pacífico. El paso de este huracán por el estado de Sonora fue los días 3 y 4 de septiembre, registrando una cifra record de lluvia en la estación Empalme, donde las lluvias máximas puntuales en 24 horas reportadas en el área estudiada fueron: del 2 al 3 de septiembre de 157.0 mm y del 3 al 4 de septiembre 514.9 mm.

El acuífero se encuentra en una zona de clima muy seco semicálido, por lo que gran parte de la precipitación pluvial en el área vuelve a la atmósfera a través de la evapotranspiración, la cual en este trabajo se calculó a partir del método indirecto de Coutagne, obteniendo una evapotranspiración real anual de 263 mm.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

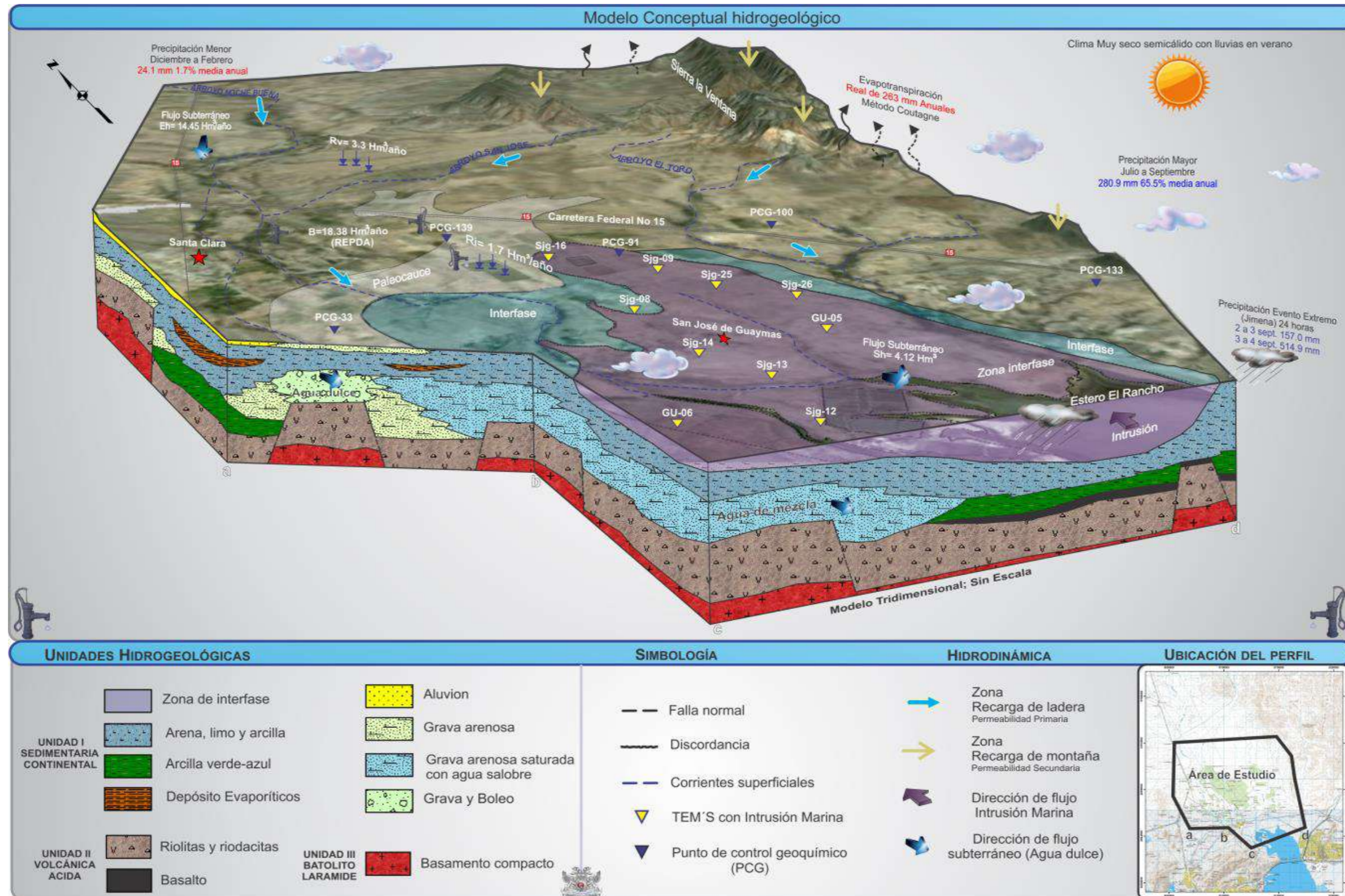


Figura 7.2. Modelo Conceptual Hidrogeológico del Acuífero San José de Guaymas (CEA, 2012).



Parte de esta precipitación se integra al sistema como una escorrentía superficial, representada por los sistemas fluviales principales dentro del acuífero que desembocan en el estero El Rancho, los más importantes son los ríos San José y Nochebuena en la porción centro y oeste, mientras que hacia el límite oriental se tiene el arroyo El Toro.

Las entradas que se tienen calculadas al sistema acuífero del área estudiada suman un total de 19.45 Hm³ anuales, incluyendo la recarga vertical, la inducida por el riego y el flujo subterráneo horizontal. Por las características definidas a partir de las unidades hidrogeológicas del subsuelo, se puede establecer que esta agua se almacena en dos elementos importantes: 1) como un acuífero superior libre de bajo espesor no mayor a los 50 m, y 2) como un acuífero en las unidades Ic y Id semiconfinado por la unidad Ib. En este modelo se identifica una zona determinada como "zona de intrusión salina", la cual se interna al continente afectando solo a la porción superficial del subsuelo a lo largo del acuífero superior, logrando desarrollar variaciones temporales en la calidad del agua subterránea.

Las salidas de este sistema acuífero fueron evaluadas y se definió que el flujo subterráneo horizontal hacia el mar corresponde a 4.12 Hm³ anuales; mientras que la salida mayor se tiene a partir de la acción antropogénica, donde la información del REPDA establece que la extracción de agua subterránea a partir del bombeo asciende a 18.38 Hm³ anuales.

Las unidades rocosas del subsuelo presentan una configuración de bloques y fosas estructurales limitadas por fallas, y su constitución y grado de fracturamiento permiten ubicarlo como un basamento impermeable.

7.3 MODELO HIDROGEOQUÍMICO

En los acuíferos costeros en condiciones naturales, se produce un movimiento tridimensional del agua dulce hacia el mar, considerando que son miscibles el agua dulce y el agua salada, existe un proceso de difusión en donde las aguas se mezclan progresivamente.



A partir de los diversos resultados obtenidos del muestreo de agua subterránea en diferentes años (2008, 2009 y 2012) y con la incorporación de datos de otros estudios realizados en la misma zona, se generó un modelo hidrogeoquímico basado en la presencia de diversos iones en el agua subterránea de este acuífero costero y su interacción con el agua de mar, considerando también la afectación, producto de diferentes fenómenos meteorológicos.

Se aprecian dos diferentes zonas en donde interactúa el agua subterránea y el agua proveniente del mar:

7.3.1 Zona de Interfase

La zona de interfase es la que se encuentran en constante interacción el agua dulce y el agua salada, manteniendo un equilibrio que se debe a la miscibilidad de las aguas, se caracteriza por un alto enriquecimiento de sales provenientes del agua marina y que afecta de manera drástica la calidad del agua subterránea para uso y consumo humano, así como para riego de cultivos. En este caso, el agua es más rica en cloruros, calcio, bromuro y magnesio, indicando que el agua de mar entrante es de origen moderno.

Utilizando datos de hidrogeoquímica e isótopos estables se definió esta zona, principalmente basándose en los resultados de las relaciones Cl/Br y Cl/HCO_3 de los pozos 91, 92 y 97; y de los cuales se extrae agua con un alto grado de salinidad y que se a mostrado en las diferentes campañas de muestreo (Figura 7.3 y 7.4). En el caso del acuífero San José de Guaymas, esta zona se encuentra avanzando y retrocediendo de acuerdo los fenómenos de pleamar y bajamar, así como por fenómenos meteorológicos tales como tormentas tropicales o huracanes, que permiten el avance del mar al continente, pero en ocasiones se retira permitiendo el avance del agua dulce proveniente de la zonas de recarga del acuífero.



7.3.2 Zona de Mezcla

Esta zona se genera por el desplazamiento de la zona de interfase, debido a la disminución en el flujo de agua dulce al mar, así como por la heterogeneidad de la permeabilidad de los materiales que conforman el acuífero y de las oscilaciones de las mareas; delimitando así la zona de interfase. Los niveles de salinidad que aparecen bajan la calidad del agua, sin embargo, no provienen de un contacto constante con el agua de mar, si no de aguas contenidas en el paquete de arcillas y que provienen del intermitente avance y retroceso de la zona de interfase, así como a fenómenos meteorológicos, acumulándose agua con altos contenidos en sales en el material confinante y que al momento de la recarga del acuífero incorpora dichas sales, enriqueciendo el agua y dando así las características que definen a esta zona. El modelo hidrogeoquímico de esta zona se generó a partir de los datos de relaciones de Cl/Br y Cl/HCO₃ de los pozos 34, 35, 74CC2, 101, 145, 189 y 196.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

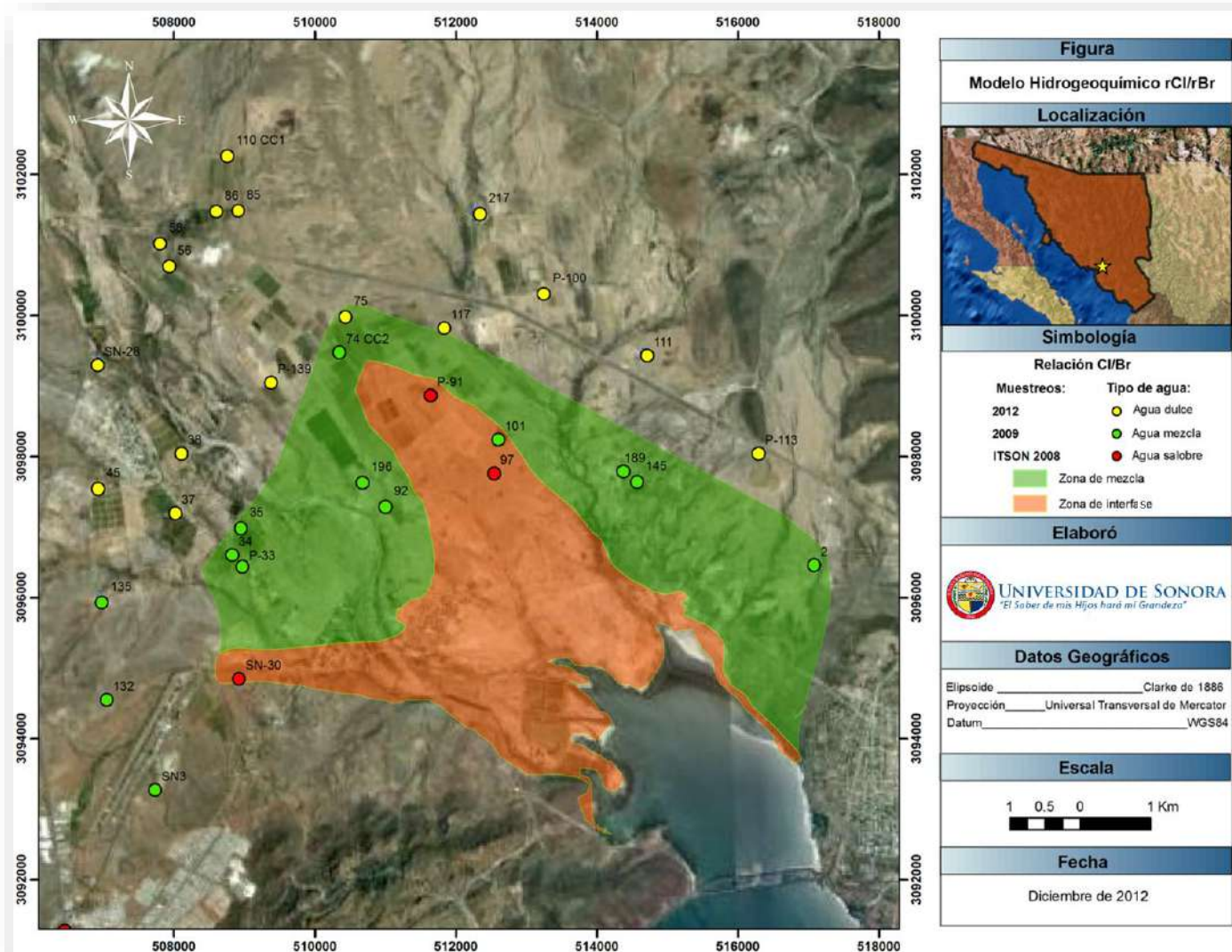


Figura 7.3. Modelo Hidrogeoquímico (rCl/rBr) del Acuífero San José de Guaymas.



Hidrogeoquímica del acuífero San José de Guaymas, Sonora,
con énfasis en la determinación del frente de intrusión marina.

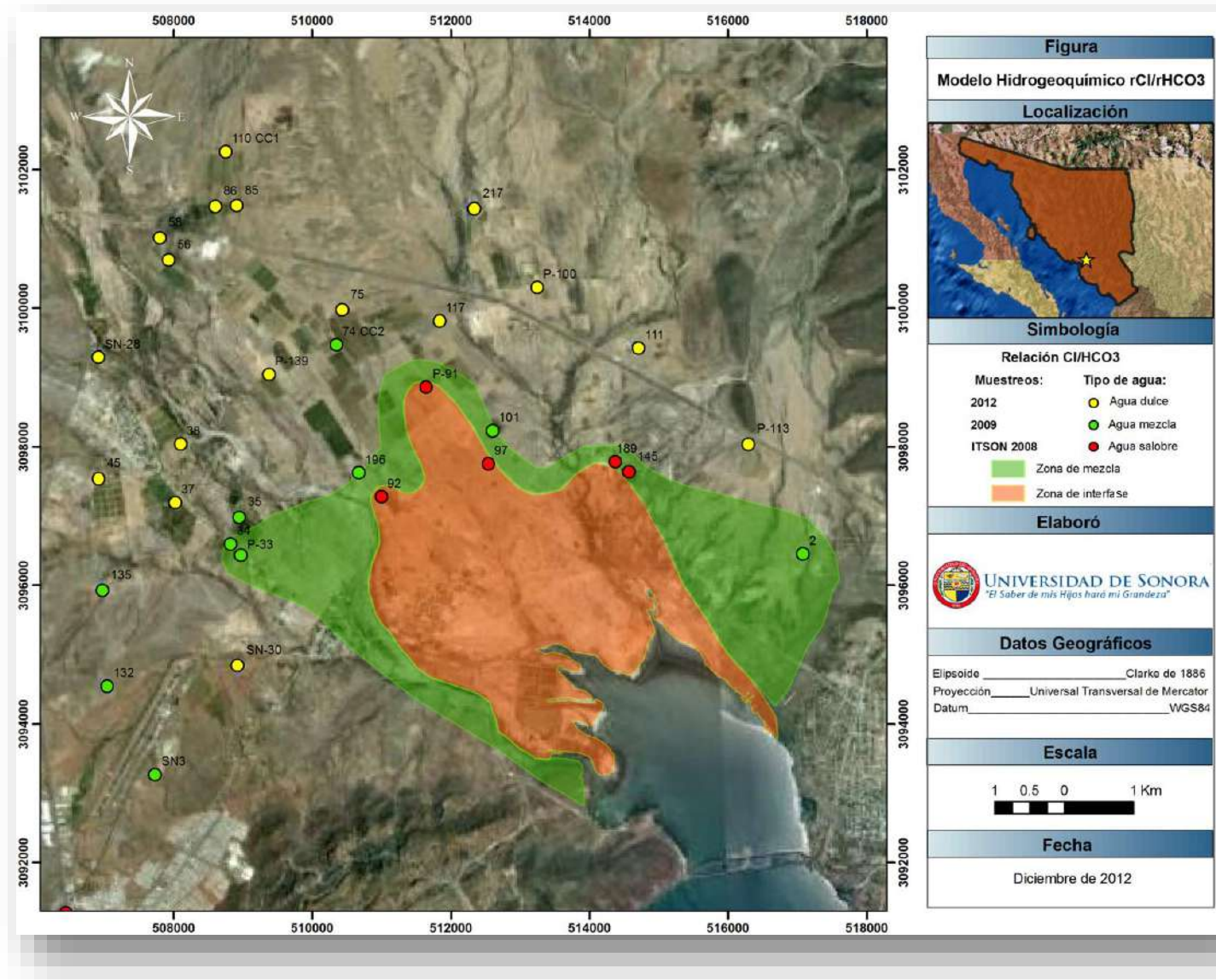


Figura 7.4. Modelo Hidrogeoquímico ($rCl/rHCO_3$) del Acuífero San José de Guaymas.



8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

- La piezometría no revela claramente la presencia de intrusión salina, y de acuerdo a la evolución del nivel estático, el acuífero se encuentra en estabilidad hidrodinámica, con una tendencia a la recuperación en los últimos 6 años.
- De manera general las elevaciones del nivel estático se han mantenido desde **1995 a al 2011**, con pequeñas oscilaciones pero manteniéndose con valores de -4.0 a -6.0 msnm y de 8.0 msnm.
- Las resistividades características de la zona de interfase dejan de aparecer a partir de una elevación de -100 msnm. Por lo que los valores similares que eventualmente aparecen en los perfiles a mayores profundidades a partir de esta elevación, son considerados como una arcilla depositada bajo la influencia de la actividad marina (arcilla verde-azul).
- Las resistividades por debajo del plano a una elevación -125 msnm se incrementan, por lo que muy probablemente se tenga dentro de esta porción un acuífero confinado, más o menos a una profundidad de 150 m, el cual presenta una zona de agua de mezcla donde las resistividades son menores a medida que se acerca a la posición del estero El Rancho.
- Se considera que la porción más salobre de esta zona de interfase que se tiene de manera somera en el acuífero, es respuesta a eventos extraordinarios que alteran las condiciones de energía superficial del agua salada en el estero y logra penetrar hacia el acuífero.
- El basamento hidrogeológico en la porción sur del acuífero San José de Guaymas, está constituido por un espesor importante de una secuencia rocosa dominada por rocas volcánicas - riolíticas y basálticas del Mioceno, que descansan discordantemente sobre un basamento Cretácico-Terciario cuya composición varía de granito a granodiorita.
- El agua subterránea muestra tanto en planta como en perfil tres zonas: a) una zona no afectada por la zona de interfase alejada de la costa, b) una zona donde existe agua subterránea salobre-salina estacionalmente



afectada por incremento de sales y, c) una zona de transición que se localiza entre ambas.

- Los aprovechamientos situados al suroeste del acuífero, más cercanos al estero El Rancho, son aquellos que presentan una baja calidad de agua para uso y consumo humano, así como para riego agrícola.
- Los valores de conductividad eléctrica en esta zona rebasa los 9000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de más de 4000 ppm en STD, notándose la alta concentración de solutos concentrados en el agua.
- Se presentan valores de cloruro por arriba de 3000 mg/L, característicos del enriquecimiento producido por la combinación con agua de mar y sus contenidos altos de este ion.
- Los valores de magnesio van de 69.6 a 163.2 mg/L; el ion bromuro tiene un rango entre 4.31 y 6.63 mg/L evidencia rastros de agua de mar, ya que es poco común en aguas dulces y para el caso del calcio van de 312 a 592 mg/L.
- Los valores de cloruros van de 42.9 a 478 mg/L, el valor más alto corresponde al aprovechamiento 45, al oeste de la zona de estudio de tesis.
- Una vez que se analizó la información resistiva del subsuelo, se generaron las unidades geoelectricas y se integraron a los resultados de la geoquímica del agua subterránea, **se estableció que en este acuífero no se tiene una intrusión salina como tal, y se propone que la zona de agua subterránea de mala calidad y una muy baja resistividad, se considera como una zona de interfase con una zona somera más salina y otra salobre más profunda.**



8.2 Recomendaciones

1. Continuar con el monitoreo piezométrico e hidrogeoquímico para dar seguimiento al comportamiento hidrodinámico del acuífero. En este sentido, se recomienda habilitar los aprovechamientos abandonados para que funcionen como piezómetros.
2. Se recomienda realizar un estudio de evaluación de la hidrodinámica del estero El Rancho, principalmente para definir su relación con la zona de extracción.



BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera C. y Martínez, E., 1996.** Relaciones agua, suelo, planta, atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo, México.
- APHA (American Public Health Association), 1995.** Standard Methods for the examination of water and wastewater, 19th ed, New York, 769 pp.
- Centro Queretano de Recursos Naturales (2006)** Tomo X: Estudio exploratorio de las condiciones isotópicas e hidrogeoquímicas de afloramientos en la comunidad del arbolito, municipio de Cadereyta, Qro. Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Querétaro. México.
- Castillo G. J., 2003.** Aplicación de diferentes Métodos para estudiar la Intrusión Salina en Acuíferos de Sonora, México.
- Comisión Nacional del Agua, 1986.** Dictamen Geohidrológico valle San José de Guaymas, municipio de Guaymas, Sonora. Reporte Interno.
- Comisión Nacional del Agua, Jefatura del Programa Hidráulico Residencia de Geohidrológica y de Zonas Áridas, 1986.** Informe Geohidrológico sobre El Valle de San José de Guaymas.
- Comisión Nacional del Agua (1994).** "Manual para evaluar recursos hidráulicos subterráneos".
- Comisión Nacional del Agua, 2002.** Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero San José de Guaymas, Sonora.
- Comisión Estatal del Agua, 2008.** Estadísticas del agua en el Estado de Sonora. Primera edición.
- Custodio, E. y Llamas, M. R., 1996.** Hidrología subterránea. Editorial Omega. Barcelona. Tomos I y II.
- Fetter, C. W., 1994.** Applied Hydrogeology. University of Wisconsin-Oshkosh. Tercera Edición. Estados Unidos.
- Freeze, R. A. & Cherry, J., 1979.** Groundwater, Prentice Hall, Inc, Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.A.



- García, E., 1981.** Modificación al sistema climático de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). Ed. Instituto de Geografía, U.N.A.M., México, D.F.
- Geyh, Mebus. 2000.** Groundwater and Unsaturated Zone, in Mook, Wille, ed., Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle. Technical Documents in Hydrology, UNESCO, Paris.
- Hammer S. 1939,** Terrain corrections for gravimeter stations: Geophysics 4, 184–194.
- Instituto Tecnológico de Sonora, 2008.** Estudio de evaluación geofísica e hidrogeoquímica del avance de la intrusión salina en el acuífero de San José de Guaymas, Sonora.
- Lugo H., 1990.** Relieve de la República Mexicana. Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, vol. 9 No. 1, México, p.p. 82-111.
- Malgorzata Pruszkowska (2006)** Los isótopos en los estudios hidrogeológicos (Seminario de Posgrado). Universidad Católica de Chile. Chile.
- Mazor, E., 1997.** Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology, The applied Approach, second edition, Revised and expanded Marcel Dekker, Inc, Halsted Press a Division of John Wiley and Sons, U.S.A.
- Monreal, R; J., Castillo; M., Rangel; M., Morales; L. A., Oroz y H. Valenzuela. 2001.** La intrusión salina en el acuífero de la costa de Hermosillo, Sonora. AIMMGM, AC. XXIV Convención Internacional. Acapulco, Guerrero. Oct. 17-20, 2001.
- Rangel-Medina, M.; Monreal, R.; Minjarez Sosa, I.; Espinoza Maldonado, I.; Ochoa Granillo, A.; Grijalva Montoya, F. y P., Sosa León. (2012)** Caracterización del agua del acuífero valle del río yaqui utilizando isótopos ligeros (3H, 2H, 14C y 18O). Revista Latino-Americana de Hidrogeología. Vol. 8, pps. 130-140. Sonora, México.
- Reyes, M. A., 2009.** Problemática del agua en los distritos de riego por bombeo del Estado de Sonora: Revista Digital Universitaria.
- Ruíz-Lugo, Jorge Luis. 2008.** Impacto de la sobreexplotación del acuífero del valle de Guaymas en la calidad del agua. Tesina para obtener el diploma de Especialidad en Gestión Integrada de Cuencas Hidrológicas, Colegio de Sonora. Hermosillo, Sonora, México. 83 pps.



Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1993. Sistema de Abastecimiento de Agua Potable para las Poblaciones de Guaymas, Empalme y San Carlos.

Stiff, H.A. Jr., 1951. The interpretation of chemical water analysis by means of patterns; Jour. Petroleum Technology, v. 8, no. 16, p. 15-17.

Técnicas Modernas de Ingeniería, S. A., 1975. Interpretación de datos y determinación del potencial actual del acuífero en la costa de Guaymas, Sonora. Realizado para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff, R.E., 1990. Applied Geophysics: Cambridge University Press, 40 West 20th St., New York, NY, 10011, USA, 770 p.

Universidad Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 1985. Ampliación al Estudio Geofísico del Valle de Guaymas, Sonora.

Universidad Autónoma de México, Instituto de Geofísica, 1985. Ampliación de la modelación Matemática de las fuentes de Abastecimiento para el suministro de agua en bloque a las ciudades de Guaymas, Empalme y San Carlos, Sonora.

Universidad de Sonora, 2005. Unidades Geohidrológicas y familias de agua de la Subcuenca arroyo Guaymas, Sonora: Bol. Depto. Geol. Unison.

Vega-Granillo, E.L.; Cirett-Galán, Samantha; De la Parra-Velasco, M.L.; y Zavala- Juárez, Raúl. 2011. Hidrogeología de Sonora, México, in Calmus, Thierry, ed., Panorama de la geología de Sonora, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Boletín 118, cap. 9.

Comisión Estatal del Agua (CEA). Fortalecimiento de la gerencia operativa del Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) de San José de Guaymas (Integración Hidrogeológica de los estudios realizados por ITSON (2008) e IDEAS (2009) en el acuífero San José de Guaymas, municipios varios en el estado de Sonora).

ANEXO I

PARÁMETROS	MUESTRA				
	133	100	91	33	139
Potencial Hidrogeno (pH)	7.38	7.27	6.66	6.88	6.84
Temperatura °C	27.57	29.75	28.76	27.88	29.76
Conductividad Eléctrica (CE) $\mu\text{S}/\text{cm}$	1071	985	9428	4640	934
Sólidos Totales Disueltos (STD) mg/L	482	407	4245	2086	421
Cloruros (Cl) mg/L	228	147	3070	1190	146
Magnesio (Mg) mg/L	36.3	8.65	268	72.2	15.8
Potasio (K) mg/L	19.5	9.08	115	43.9	13.4
Calcio (Ca) mg/L	136	80.4	1090	301	78.2
Alcalinidad Total (CaCO_3) mg/L	159	182	138	246	193
Bicarbonatos (HCO_3) mg/L	194	222	168	300	235
Carbonatos (CO_3) mg/L	12	12	12	12	12
Dureza Total (CaCO_3) mg/L	469	228	3720	938	232
Sulfatos (SO_4) mg/L	40	26	119	207	42
Nitratos (N) mg/L	4.4	6.7	0.6	9.4	7.4
Sodio (Na) mg/L	192	97.6	459	479	114
Fluoruros (F) mg/L	0.6	0.6	0.6	0.8	0.6
Bromuros (Br) mg/L	1.5	0.9	9.5	4.8	0.9