



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A. C.**

**POSGRADO EN CIENCIAS APLICADAS**

**CAMBIOS DE USO DE SUELO Y SU IMPACTO EN  
EL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN LUIS  
POTOSÍ, APLICANDO MODELACIÓN NUMÉRICA**

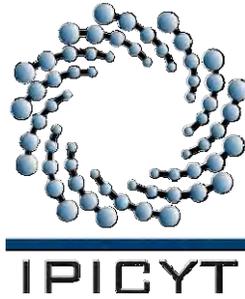
Tesis que presenta  
**Briseida López Álvarez**

Para obtener el grado de  
**Doctora en Ciencias Aplicadas**

En la opción de  
**Ciencias Ambientales**

Director de Tesis:  
**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

San Luis Potosí a 29 de Junio de 2012.



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis “**CAMBIOS DE USO DE SUELO Y SU IMPACTO EN EL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ, APLICANDO MODELACIÓN NUMÉRICA**” presentada para obtener el Grado de de Doctora en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales fue elaborada por **Briseida López Álvarez** y aprobada el **29 de Junio de 2012** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

Director de la tesis

---

**Dr. Guillermo Hernández García**

Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. José Noel Carbajal Pérez**

Miembro del Comité Tutorial

---

**Dr. Germán Santacruz De León**

Miembro del Comité Tutorial

---

**Dra. Birgit Steinich**

Miembro del Comité Tutorial



## Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la **División de Geociencias Aplicadas** del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección del Dr. **José Alfredo Ramos Leal**.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (171553) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 016 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Ciencias Aplicadas en la opción de Ciencias Ambientales está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 29 días del mes de junio del año 2012, se reunió a las 10:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Noel Carbajal Pérez</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Germán Santa Cruz de León</b>	<b>Secretario</b>	<b>COLSAN</b>
<b>Dra. Birgit Steinich</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Guillermo de Jesús Hernández García</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>UNAM</b>
<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS APLICADAS  
EN LA OPCION DE CIENCIAS AMBIENTALES**

sustentó la C.

**Briseida López Alvarez**

sobre la Tesis intitulada:

*Cambio de Uso de Suelo y su Impacto en el Sistema Acuífero del Valle de San Luis Potosí,  
Aplicando Modelación Numérica.*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

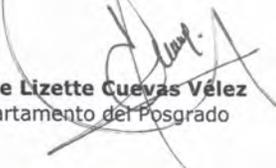
El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLA**

Dándose por terminado el acto a las 12:00 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 29 días del mes de junio de 2012.

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico

  
**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado



## **DEDICATORIA**

### **A José**

*Por tu amor, comprensión y apoyo durante todo este tiempo. Juntos hemos emprendido un camino y mis éxitos son también los tuyos.*

### **A Emmanuel y Gabriel:**

*Por ser mi motivación para seguir adelante.*

### **A mis Padres Irma y Epifanio:**

*Por su amor y porque han representado un apoyo incondicional. Gracias por estar conmigo siempre.*

### **A mis hermanas Miriam, Marlen y Ximena:**

*Por el cariño y apoyo que he tenido de ustedes siempre.*

**Los amo**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la ***División de Geociencias Aplicadas***, en primer lugar por darme la oportunidad de ser parte de su programa de posgrado y el apoyo brindado para la asistencia a congresos, lo cual contribuyó a fortalecer a mi formación académica.

Al ***Dr. José Alfredo Ramos Leal***, por haberme aceptado como su alumna y dirigir mi trabajo de tesis, por los conocimientos compartidos, por el gran apoyo recibido durante mi estancia en el posgrado y muy especialmente por brindarme su amistad, externo mi respeto y admiración para usted, gracias.

Al ***Dr. Noel Carbajal Pérez, Dr. Guillermo Hernández García, al Dr. Germán Santacruz De León*** por su apoyo, asesoría y comentarios que contribuyen a enriquecer el contenido de éste trabajo.

Al proyecto ***151666, "Problemática socioambiental asociada al uso y manejo del agua en la cuenca del Valle de San Luis Potosí"***, el cual ha recibido financiamiento del Fondo de Ciencia Básica SEP-CONACYT, en su edición 2010, por el apoyo proporcionado para la realización de esta tesis.

Al ***Dr. Antonio Cardona Benavides***, por su apoyo con información proporcionada para la realización del trabajo.

A la ***M en C. Janete Morán Ramírez*** (Quasi), por su colaboración en la realización de éste trabajo y principalmente por su amistad.

A los ***profesores del IPICYT***, que me apoyaron y transmitieron sus conocimientos.

A mis ***compañeros de la División de Geociencias (Generación Monsters Inc)***, con los que compartí el aula de clases y me brindaron su amistad.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyen con la realización de mi trabajo de tesis.

***A todos muchas gracias***

## INDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Localización del Valle de San Luis Potosí y de pozos con cargas hidráulicas en 1995 y extracciones en 1998.....	5
Figura 2. Geología del Valle de San Luis Potosí.....	6
Figura 3. Sección hidrogeológica del Valle de San Luis Potosí.....	7
Figura 4. Estratigrafía de la zona de estudio (Tomada de IPICYT, 2007).....	8
Figura 5. Geometría del sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí.....	10
Figura I.1. Primeros usos de suelo en la ciudad de San Luis Potosí en el siglo VXII.....	19
Figura I.2. Crecimiento de la mancha urbana de 1959 a 2005, (modificada de Noyola <i>et al.</i> , 2009).....	21
Figura I.3. Fuentes potenciales de contaminación y usos de suelo.....	24
Figura I.4. Distribución temporal de NO <sub>3</sub> en la zona de estudio, basados en datos de Moran-Ramírez, 2010; COTAS, 2005).....	29
Figura I.5. Distribución espacial de a) NO <sub>3</sub> (ppm), b) SO <sub>4</sub> (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	30
Figura I.5. Distribución espacial de c) Cl (ppm), d) Conductividad Eléctrica (µS/cm), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	31
Figura I.5. Distribución espacial de e) Coliformes Totales (UFC) y f) Grasas y Aceites (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	32
Figura I.6. Distribución espacial de a) Ba (ppm), b) Sr (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	34
Figura I.6. Distribución espacial de c) Hg (ppm), d) Ag (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	35
Figura I.6. Distribución espacial de e) Cd (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	36
Figura I.7. Distribución espacial de a) Rb (ppm), b) Co (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	37
Figura I.7. Distribución espacial de c) As (ppb) y d) Fe (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	38
Figura I.7. Distribución espacial de e) Cu (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	39
Figura I.8. Distribución espacial de a) Mn (ppb), b) Ni (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	40
Figura I.8. Distribución espacial de c) Al (ppb), d) Cr (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	41
Figura I.8. Distribución espacial de e) B (ppb) y f) F (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	42
Figura I.9. Distribución espacial de a) Pb (ppb) y b) Zn (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	44
Figura I.9. Distribución espacial de c) Li (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.....	45

	Pag.
Figura II.1. Localización del Valle de San Luis Potosí y Cambios de Uso de Suelo durante el periodo de 1983 a 2005.....	58
Figura II.2. Hexágono del IPA para el VSLP.....	63
Figura III.1. Conductividad hidráulica asignada por zonas en el área de estudio a) Capa 1 (acuífero granular, b) Capa 2 (acuífero fracturado).....	72
Figura III.2. Distribución de tasas de recarga en el modelo.....	74
Figura III.3. Hidrógrafo de las extracciones durante el periodo de 1995-2005 por tipo de uso (INTERAPAS 2004).....	76
Figura III.4. Discretización espacial y condiciones de frontera del modelo.....	79
Figura III.5. Simulación y calibración de flujo subterráneo 1986. A Simulación en estado estacionario; B Calibración en estado estacionario.....	80
Figura III.5. Simulación y calibración de flujo subterráneo 1986. C Correlación entre cargas hidráulicas medida y calculadas en estado transitorio, y D Calibración en estado transitorio.....	81
Figura III.6. Simulación y calibración de flujo subterráneo para 1995 y 2005. A Correlación entre cargas hidráulicas medida y calculadas en estado transitorio para 1995; B Calibración en estado transitorio para 1995.....	82
Figura III.6. Simulación y calibración de flujo subterráneo para 1995 y 2005. C Correlación entre cargas hidráulicas medida y calculadas en estado transitorio para 2007, y D Calibración en estado transitorio para 2007.....	83
Figura III.7 Extracciones anuales en el periodo 1995-2005 por tipo de uso y su proyección al año 2021 (Mm <sup>3</sup> /año).....	84
Figura III.8. Simulaciones predictivas. A. Considerando proyecciones de crecimiento poblacional y análisis de los cambios de uso de suelo y se alcanza el volumen fijado por la CONAGUA en 2021. B. Considerando un régimen de extracción constante de 136 x10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /año a 50 años.....	86
Figura III.9 Balance de masa del modelo de flujo en las capas 1 y 2.....	87

## INDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su origen, geometría, actividad y temporalidad (Fetter, 1999).....	24
Tabla I.2. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona urbana de San Luis Potosí.....	24
Tabla I.3. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona agrícola de San Luis Potosí- Soledad de Graciano Sánchez.	25

Tabla I.4. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona industrial de San Luis Potosí.....	25
Tabla II 1. Componentes clave en el IPA (Modificada de Lawrence <i>et al.</i> , 2002).....	52
Tabla II 2. Valores obtenidos para cada componente del IPA para VSLP.....	63
Tabla III.1. Extracciones anuales en el periodo 1995-2005 por tipo de uso (1X106 m3/año).....	74

## ANEXOS

Anexo A. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí.....	89
Anexo B. Teoría de flujo subterráneo.....	93

## RESUMEN

El ser humano a lo largo de su historia, ha ejercido una gran presión sobre los recursos naturales para usarlos en sus diferentes actividades. En el caso del agua, se han propiciado entre otras cosas, cambios de uso de suelo del medio natural y una diferenciada disponibilidad del recurso. La urbanización ha provocado deforestación, erosión, pérdida de la biodiversidad, sus servicios ambientales, un alto impacto en la degradación y el agotamiento de los recursos hídricos.

Este es el caso de la Ciudad de San Luis Potosí, cuya historia de urbanización se remonta al siglo XVI. El factor más importante para la fundación de la ciudad fue la presencia de cuerpos de agua, en lo que hoy es la zona centro del Valle de San Luis Potosí. La minería fue el principal detonador del crecimiento y desarrollo de la nueva población, dando lugar a los primeros usos de suelo, el urbano, minero y agrícola. Durante los primeros cuatro siglos desde su fundación, los cambios de uso de suelo fueron graduales; sin embargo, a partir de la segunda mitad del siglo pasado los cambios han sido drásticos. De tal manera que han dado lugar a la alteración del sistema acuífero en cantidad y calidad, limitando la disponibilidad del recurso a la población. El diagnóstico de calidad del agua del acuífero colgado, muestra un importante deterioro por la presencia de contaminantes orgánicos (grasas y aceites) e inorgánicos (metales, sulfatos y nitratos). El origen de éstos contaminantes están asociados a las actividades que se desarrollan en los diferentes usos de suelo (urbano, agrícola e industrial) desde la fundación de la ciudad.

Otros factores que limitan la disponibilidad del agua en la zona de estudio son las características naturales como baja precipitación anual (350 mm); una alta evapotranspiración anual (2000 mm); corrientes superficiales intermitentes; la existencia de un sistema acuífero con extracción intensiva y muy baja recarga. Una forma de evaluar los componentes que afectan la disponibilidad del agua a la población es el Índice de Pobreza del Agua, el cual vincula el bienestar de los hogares con la disponibilidad de agua e indica el grado de los efectos de la escasez de agua en las poblaciones humanas. Para el caso del Valle de San Luis Potosí, este índice resulta muy bajo debido a las características antes mencionadas.

Los efectos de los cambios de uso de suelo sobre el sistema acuífero, es evaluado por medio de modelos numéricos para predecir esquemas de manejo y pronóstico de los efectos del bombeo en el agua subterránea. Para establecer una planeación adecuada del recurso. El modelo numérico para el Valle de San Luis Potosí indica que debido al manejo que ha tenido el acuífero, se ha generado un gran cono de abatimiento en la zona urbana, de seguir así bajo el actual régimen de extracción, se tendrá un descenso generalizado en los niveles del agua subterránea, de tal manera que para el año 2021, se alcanzará el volumen concesionado por la CONAGUA para éste acuífero (136Mm<sup>3</sup>/año). Por otro lado si se toman las medidas adecuadas para su conservación se alcanzara mantener durante el mayor tiempo el recurso.

Palabras clave: cambio de uso de suelo, índice de pobreza de agua, modelación numérica, Valle de San Luis Potosí.

## ABSTRACT

Throughout history human being has done great pressure on natural resources for use them in different activities. Among other things in the case of water it has been favored, changes in land use of the natural environment and a differential availability of the resource. Urbanization has caused deforestation, erosion, and loss of biodiversity, environmental services, a high impact on the degradation and depletion of water resources.

This is the case of San Luis Potosi City, whose urbanization history dates back to sixteenth century. The most important factor for the founding of the city was the presence of water bodies, in what is now the center of Valle de San Luis Potosi. Mining was the main cause for the growth and development of the new population, leading to the first land uses, urban, mining and agricultural. During the first four centuries since its foundation, the land use changes were gradual, but from the second half of last century the changes have been dramatic. So the change has led to the alteration of the aquifer system in quantity and quality, limiting the availability of the resource to the population. The diagnosis of water quality of the perched aquifer shows a significant deterioration in the presence of organic contaminants (fats and oils) and inorganic (metals, sulfates and nitrates). The origins of these pollutants are associated with the activities taking place in different land uses (urban, agricultural and industrial) since the foundation of the city.

Some other factors that limit the availability of water in the study area are the natural characteristics such as low annual rainfall (350 mm), a high annual evapotranspiration (2000 mm), intermittent surface flows, and the existence of an aquifer system with intensive extraction and very low recharge. One way to evaluate the components that affect water availability to the population is the Water Poverty Index, which links household welfare with water availability and indicates the degree of the effects of water shortages in the human populations. In the case of Valle de San Luis Potosi, this index is very low due to the characteristics mentioned previously.

The effects of changes in land use over the aquifer system are evaluated by numerical models to predict prognosis and management schemes of the effects of pumping groundwater. To establish a proper planning of the resource. The numerical model for the Valley of San Luis Potosi shows that due to management that has had the aquifer, it has generated a large cone of depression in urban areas, and if it continues under the current regime of extraction, there will be a general decline in groundwater levels, so that by the year 2021, the volume will be reached by the CNA concession for this aquifer (136Mm<sup>3</sup>/per year). On the other hand if we take the appropriate measures for their conservation it will reach to keep for as long as the resource.

Keywords: land use change, water poverty index, numerical modeling, Valle de San Luis Potosi.

## CONTENIDO

### GENERALIDADES

Pag.

1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	3
3. Justificación.....	3
4. Área de estudio.....	4
5. Sistema Acuífero del Valle de San Luis Potosí.....	11
6. Diferencias químicas de la calidad del agua subterránea del sistema acuífero del Valle de San Luis potosí.....	12
7. Bibliografía.....	14

### CAPITULO I. ORIGEN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO COLGADO Y SU RELACIÓN CON LOS CAMBIOS DE USO DE SUELO EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ.

I.1. Introducción.....	17
I.2. Metodología.....	20
I.3. Resultados y discusión.....	22
I.3.1. Evolución del cambio de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí.....	22
I.3.2. Origen de la Fuentes Contaminantes del Agua Subterránea en el Valle de San Luis Potosí.....	23
I.3.3. Tipo de fuentes potenciales de contaminación.....	25
I.3.3.1. Origen.....	26
I.3.3.2. Geometría.....	27
I.3.3.3. Actividad.....	28
I.3.3.4. Temporalidad.....	28
I.3.3. 5. Contaminación en zonas urbanas.....	29
I.3.3.6. Contaminación en zonas agrícolas.....	43
I.3.3.7. Contaminación en zonas industriales.....	43
I.4. Conclusiones.....	46
I.5. Bibliografía.....	48

### CAPITULO II. CALCULO DEL INDICE DE POBREZA DEL AGUA EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSI

II.1. Introducción.....	51
II.2. Desarrollo del IPA para el Valle de San Luis Potosí.....	52
II.2.1. Recurso.....	54
II.2.2. Acceso.....	54
II.2.3. Capacidad.....	55
II.2.4. Uso.....	55
II.2.5. Medio ambiente.....	56
II.2.6. Calidad.....	57
II.3. Resultados y discusión.....	59

	Pag.
II.3.1. Componentes del IPA.....	59
II.3.1.1. Recurso.....	59
II.3.1.2. Calidad.....	60
II.3.1.3. Uso.....	61
II.3.1.4. Acceso.....	61
II.3.1.5. Capacidad.....	62
II.3.1.6. Medio Ambiente.....	62
II.4. Índice de pobreza del agua para el Valle de San Luis Potosí.....	63
II.5. Conclusiones.....	64
II.6. Bibliografía.....	66

### **CAPÍTULO III. MODELO DE FLUJO DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ**

III.1. Introducción.....	70
III.2. Modelo conceptual.....	70
III.2.1. Propiedades del acuífero.....	70
III.2.2. Cargas hidráulicas y evolución hidrogeológica.....	71
III.2.3. Recarga y aportes laterales.....	73
III.2.4. Extracciones.....	74
III.2.5. Balance de agua subterránea.....	76
III.3. Modelo numérico.....	77
III.3.1. Ecuaciones.....	77
III.3.2. Discretización espacial y temporal.....	77
III.3.3. Condiciones de frontera.....	78
III.3.4. Calibración.....	78
III.4. Resultados y discusión.....	79
III.5. Conclusiones.....	88
III.6. Bibliografía.....	89

### **CAPITULO IV. RECOMENDACIONES**

Recomendaciones.....	92
----------------------	----

### **CONCLUSIONES GENERALES**

Conclusiones generales.....	95
-----------------------------	----

## **GENERALIDADES**

## 1. INTRODUCCIÓN

El ser humano a lo largo de su historia, ha ejercido una gran presión sobre los recursos hídricos desviando, captando, almacenando, extrayendo y contaminando en el desarrollo de sus diferentes actividades. Estas alteraciones, han propiciado entre otras cosas, cambios de uso de suelo del medio natural y una diferenciada disponibilidad del recurso.

El cambio de uso de suelo debido a la urbanización ha provocado deforestación, erosión, pérdida de la biodiversidad y sus servicios ambientales y un alto impacto en la degradación y el agotamiento de los recursos hídricos.

En México el cambio de uso de suelo se debe a diferentes factores. Las actividades humanas que causan degradación son la deforestación, en un 29%; prácticas agrícolas inadecuadas, 28%; sobrepastoreo, 35%; extracción de leña, 7%; industria y urbanización, 1%) y específicamente en el rubro de la deforestación, el 82% de ésta, corresponde a desmontes agropecuarios (Urbina-Soria y Martínez-Fernández, 2006).

En lo que a recursos hídricos se refiere, en México, la Comisión Nacional del Agua monitorea más de 215 cuerpos de agua superficial de los cuales, el 5% la calidad del agua es aceptable para cualquier tipo de uso, 22% es aceptable, 49%, es poco contaminada, 15% es contaminada, 7% es altamente contaminada y el 2% tiene incluso, presencia de tóxicos (INE, 2003). En lo que respecta al agua subterránea, el país cuenta oficialmente con 653 acuíferos administrativos, 100 de ellos sobreexplotados y de los cuales se extrae el 53.6% del agua subterránea para todos los usos (CONAGUA, 2011). El agua subterránea constituye la fuente de abastecimiento para 75 millones de mexicanos; sin embargo, de su calidad poco se sabe (Jiménez *et al.*, 2005).

La disponibilidad de agua en cantidad y calidad para consumo humano se ha convertido en un importante problema de las sociedades actuales. La UNESCO (2006) reconoció y definió a la disponibilidad del agua potable como un derecho humano básico. La falta o deficiente disponibilidad del agua es muy acentuada en zonas áridas o semi-áridas; sin embargo, en regiones con mayores recursos hídricos no tienen garantizado el recurso.

En regiones áridas, cuya disponibilidad de agua superficial es escasa e incluso nula, el agua subterránea representa un recurso indispensable o único y llega a ser en muchos casos, más económica y con menos posibilidades de contaminación con respecto a los cuerpos de agua superficial.

Este es el caso del Valle de San Luis Potosí, cuyas características naturales como baja precipitación anual (351 mm); una alta evapotranspiración anual (2038.7 mm); corrientes superficiales intermitentes; la existencia de un sistema acuífero con extracción intensiva y muy baja recarga, representan una limitante en la disponibilidad natural del agua. Aunado a las condiciones naturales, existen

características socioeconómicas que generan una distribución diferenciada del recurso tanto en volúmen como en calidad en el área de estudio.

Desde mediados del siglo pasado, existen diversos estudios e investigaciones realizadas en relación al sistema acuífero de San Luis Potosí. Uno de los primeros en ser reportados es el realizado por Stretta y Del Arenal (1960), para evaluar los recursos hídricos globales en la región, ellos diferencian por primera vez dos acuíferos: somero y profundo. El primero de bajo rendimiento y contaminado por aguas negras y el segundo lo citan como posible fuente de abastecimiento de agua.

Algunos estudios estuvieron dirigidos a revisar aspectos hidrogeológicos del sistema acuífero (Medina, 1961; Medina, 1974; Consultores 1977; Labarthe y Tristán, 1978; Cardona-Benavides y Carrillo Rivera, 2006). También se han realizado investigaciones encaminadas a evaluar la evolución piezométrica (Martínez y Aguirre, 1984; Martínez, 1986; Carrillo-Rivera, 1992; CNA, 1996-a; COTAS, 2005; Cardona-Benavides y Carrillo Rivera, 2006), además de la calidad del agua subterránea (Medina, 1961; Cardona-Benavides, 1990; Carrillo y Armienta, 1990; CNA, 1996-b; Castillo, 2003; COTAS, 2010; Cardona-Benavides y Carrillo Rivera, 2006; Morán-Ramírez, 2010).

La modelación numérica también fue aplicada para evaluar el sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí (SARH-CNA-UNAM, 1992; Difurt *et al.*, 1995; Khon-Ledesma, 2010) y recientemente el tema de redes de monitoreo de calidad y carga hidráulica de agua subterránea fue abordado en la zona de estudio (Espino, 2008; López-Álvarez, 2008; Hergt, 2009).

En los trabajos antes mencionados se han abordado de manera separada los diferentes elementos que componen de forma general, la complejidad de la problemática del agua subterránea. Es por ello que en este trabajo se estudia el sistema acuífero Valle de San Luis Potosí, para entender la situación en la que se encuentra, se consideran aspectos clave como su historia, el entorno socioeconómico y la evaluación de sistema hidrogeológico mediante la modelación numérica. Es así, como el trabajo está estructurado en tres principales capítulos.

El Capítulo I, está enfocado a evaluar el impacto que ha generado la actividad antropogénica sobre el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí desde la fundación de la ciudad hasta la actualidad. En él se explica el origen complejo de las fuentes de contaminación en el agua subterránea.

En el Capítulo II, se obtuvo el índice de pobreza del agua en la zona de estudio. Este índice sirve de diagnóstico para entender los diferentes factores naturales y antropogénicos que afectan la disponibilidad de agua en el bienestar de los hogares.

En el Capítulo III, se utiliza modelación numérica como herramienta de evaluación de los efectos del bombeo en el agua subterránea debido a los cambios de uso de suelo.

En el capítulo IV, se presentan una serie de recomendaciones para hacer un buen uso del agua dentro de los principales usos de suelo en el Valle de San Luis Potosí.

En el capítulo V, finalmente se presentan las conclusiones generales del trabajo de investigación.

## **2. Objetivos**

### **Objetivo general**

- Evaluar el impacto del cambio de uso de suelo y sus efectos en la disponibilidad del recurso hídrico, aplicando modelación numérica al sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí.

### **Objetivos particulares**

- Evaluar el impacto del cambio de uso de suelo en la zona de estudio.
- Obtener la relación entre el bienestar social y la disponibilidad del agua.
- Construir el modelo numérico del sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí.

## **3. Justificación**

Para comprender la disponibilidad del recurso hídrico, su condición de minado y deterioro de la calidad del agua en la que se encuentra el sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí, es necesario analizar la evolución histórica de las fuentes potenciales de contaminación y su relación con los diferentes usos de suelo, además aplicar modelos numéricos para facilitar su estudio.

#### 4. Área de estudio

El Valle de San Luis Potosí (VSLP) se encuentra limitado orográficamente al norte por un conjunto de cerros llamados “Alto La Melada”, al poniente y sur por la Sierra de San Miguelito y al oriente por la Sierra de Álvarez (Figura 1).

En el VSLP se encuentra el sistema acuífero de San Luis Potosí (SLP) que forma parte de la cuenca hidrológica No. 37 denominada “El Salado” con coordenadas geográficas 21°54'54” a 22°28'15” de latitud norte y 101°13' 44” a 100°37'08”, en la porción sur-occidental del estado del mismo nombre. La zona de estudio tiene un clima templado con verano cálido-semiárido. La precipitación media anual es de 351 mm y una temperatura media anual de 17.5 °C. La evaporación potencial media anual de 2038.7 mm (Moreno *et al.*, 2004; García, 2004).

El VSLP es una planicie de piedemonte que corresponde a una fosa tectónica limitada por fallas escalonadas en los bordes de la Sierra de San Miguelito (SSM) al oeste y de la Sierra de Álvarez (SA) (Figura 2).

La columna estratigráfica en la región incluye rocas sedimentarias y volcánicas cuyas edades van del Cretácico al Reciente (Figura 3). En el valle las rocas del Cretácico están constituidas principalmente calizas de estratificación delgada de las formaciones Indidura y Cuesta del Cura, debido a que éstas unidades son de origen de cuenca marina poseen una baja conductividad hidráulica. Cubriendo discordantemente a estas unidades cretácicas se encuentran rocas volcánicas del Terciario, estas unidades están formadas por derrames de basaltos, latitas, ignimbritas, éstas unidades volcánicas fracturadas alcanzan espesores de hasta 500 m y son cubiertas por material granular semi-consolidado de espesor muy variable (desde 80 m hasta 350 m y en algunos casos mayores a 500 m de espesor); en algunas zonas se observan intercalaciones de basaltos con sedimentos cuaternarios, ignimbritas riolíticas y tobas arenosas del Oligoceno Medio y Superior (Labarthe *et al.*, 1982).

El agua subterránea en el área de estudio se presenta en acuíferos granulares del Cuaternario, que están constituidos de capas discontinuas lateralmente por grava, arena y arcilla; así como, en medio fracturado en rocas volcánicas del Terciario (Figura 3). El sistema acuífero puede dividirse en una unidad somera y una unidad profunda. La unidad somera, extendiéndose a una profundidad de aproximadamente 15 a 200 m debajo de la superficie del terreno, está compuesta de arena y grava. Esta unidad tiene buena conductividad hidráulica y es productora de agua. La unidad profunda tiene espesor variable, el fondo está entre 300 y 800 m debajo de la superficie del terreno y está compuesta principalmente por rocas volcánicas fracturadas de buena conductividad hidráulica. La unidad somera no está conectada hidráulicamente con la unidad profunda.

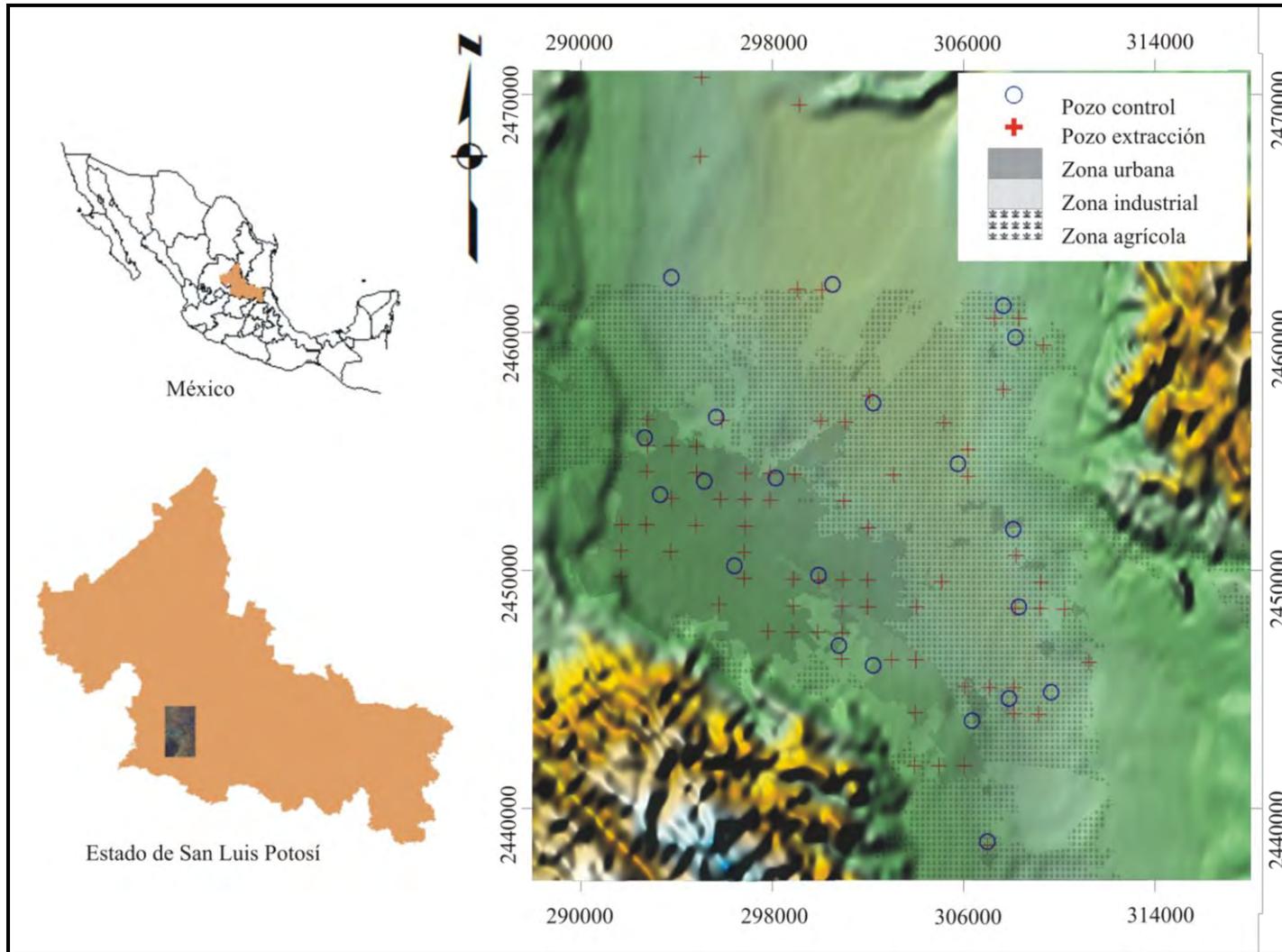


Figura 1. Localización del Valle de San Luis Potosí y de pozos con cargas hidráulicas en 1995 y extracciones en 1998.

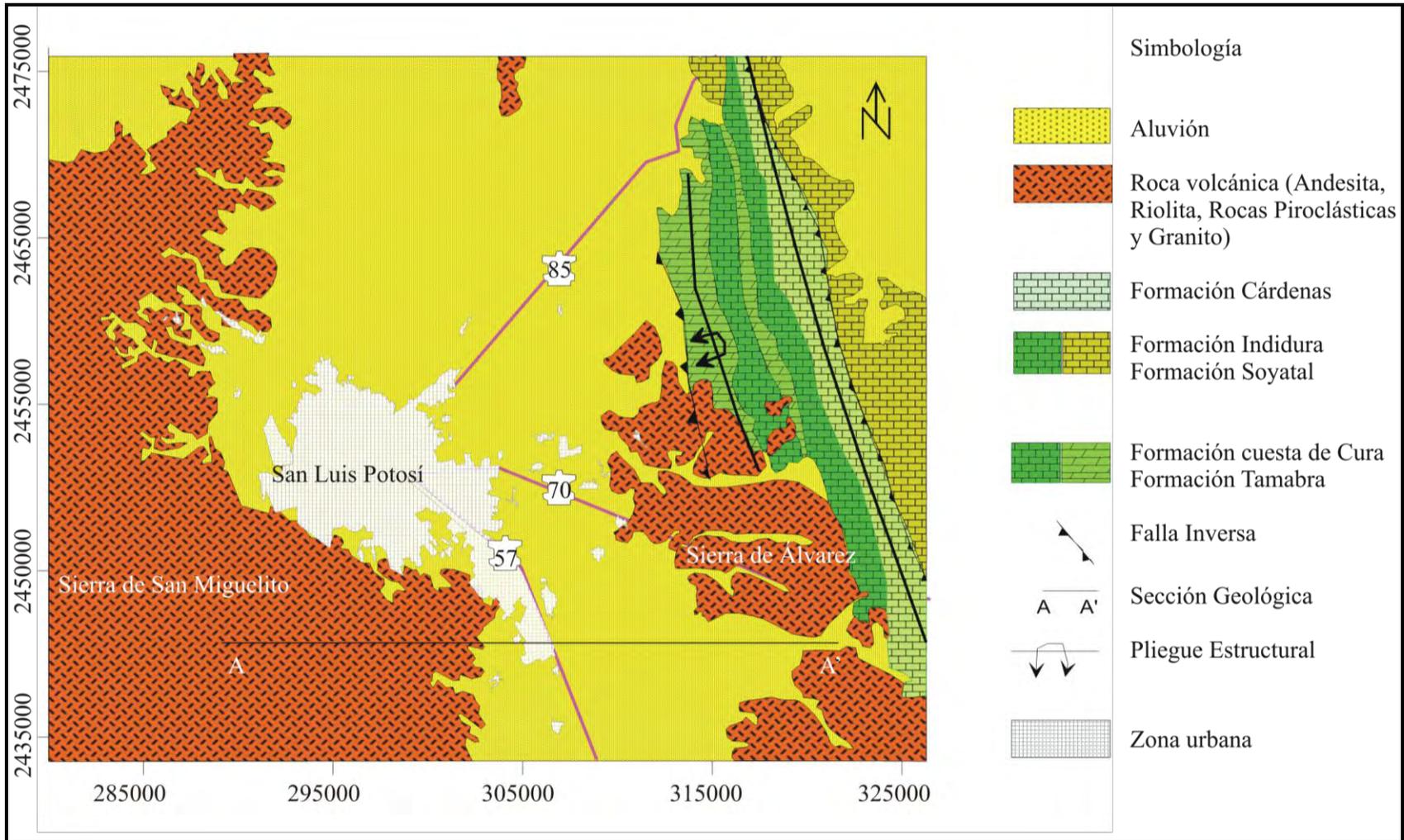


Figura 2. Geología del Valle de San Luis Potosí.

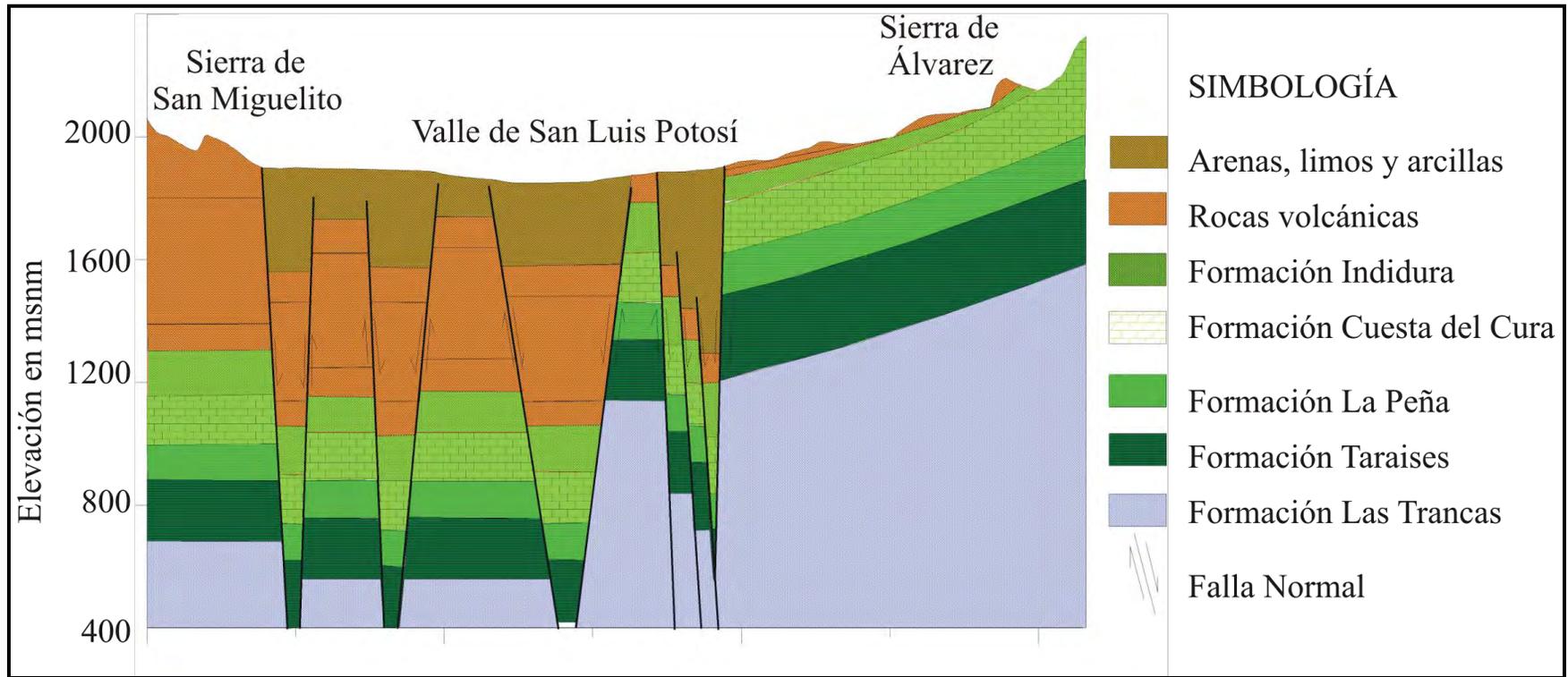


Figura 3. Sección hidrogeológica del Valle de San Luis Potosí (Ramos-Leal *et al.*, 2007).

Debido a que la unidad del acuífero somero se ha explotado y casi agotado, los pozos de bombeo han estado extrayendo agua subterránea de la unidad profunda. En consecuencia, en este estudio la unidad profunda se considera como un sistema de flujo de un acuífero confinado.

La edad de las rocas que conforman el valle de SLP, van del Cretácico al Reciente (COTAS, 2005). La unidad más antigua corresponde a la Formación Indidura del Turoniano (Cretácico Tardío), formada por calizas arcillosas con espesor aproximado de 120 m. Aflora en la Sierra de Álvarez y en algunos casos en la Sierra de San Miguelito, en el valle se ubica entre 700 y 1200 m de profundidad (Figura 4).

	SUELO Y DEPÓSITOS DE TALUD
	DEPÓSITOS ALUVIALES (ARENAS, LIMOS Y ARCILLAS)
	LATITA PORTEZUELO
	RIOLITA PANALILLO
	FORMACIÓN CENICERA
	FORMACIÓN INDIDURA

Figura 4. Estratigrafía de la zona de estudio (Tomada de IPICYT, 2007)

Sobre ésta unidad se encuentra la Formación Cenicera de edad que va del Paleoceno al Eoceno (Terciario Temprano), formada por aglomerados, con matriz areno-limo-arcillosa, semiconsolidada y tiene un espesor aproximado entre 10 y 145 m (Labarthe et al., 1982). Su afloramiento se ubica al sur del valle y en el centro del valle a profundidades de 550 y 1000 m.

Seguida de la Formación Cenicera, se encuentra la Formación Latita Portezuelo (derrame lávico) del Oligoceno Tardío. Su afloramiento es principalmente hacia el oriente del valle y escasamente al poniente. Dentro del valle se encuentra a profundidades de 50 a 550 m con espesor de 476 m. Hacia el occidente, se encuentra parcialmente cubierta por la Riolita San Miguelito, de estructura fluidal laminar y mezcla de vitrofiros (Labarthe et al., 1982).

Subyacen divergentemente a las rocas volcánicas anteriores la Ignimbrita (Cantera) del Oligoceno Tardío. Aflora en la Sierra de San Miguelito y sólo pegada a ésta en el subsuelo. Tiene espesores de 5 a 150 m.

La porción central de valle está formado por material aluvial del Cuaternario con intercalaciones de sedimentos lacustres y conglomerados, a demás de una cubierta compacta de limos, arcillas y arenas con espesores de 1.0 a 1.5 m.

La Formación Panalillo del Oligoceno Tardío de tobas blancas areno-arcillosa en ocasiones conglomeráticas de 150 m de espesor, es cubierta por el material aluvial anterior. Ésta unidad se encuentra rellenando la parte inferior de la fosa tectónica que originó el valle de SLP.

El subsuelo del valle de SLP está conformado por dos depresiones tectónicas (Figura 5): la de menor profundidad en la región de Peñasco y la de mayor profundidad en la zona denominada San Luis (COTAS, 2005).

La primera depresión, se localiza al norte del valle con orientación preferencial norte-sur, con extensión aproximada de 80 km<sup>2</sup> y de profundidad del piso rocoso de hasta 350 m.

La segunda depresión se localiza hacia el norte, en el alto estructural de Rinconada; al poniente, desde San Marcos de Carmona hasta Portezuelo y al oriente, en el Huizache. Al sur continua con la de Villa de Reyes con rumbo noreste a suroeste.

El piso rocoso de esta depresión es variante en su profundidad. En la región de Soledad va de los 500 a los 570 m de profundidad. El área de menor profundidad se localiza en la zona que va de la Glorieta Juárez hasta la delegación de La Pila y desde la vía del FFCC México-San Luis hasta la Avenida Industrias (zona termal), con profundidades de 100 a 250 m. Hacia el poniente y en algunas partes del centro del valle existen situaciones particulares de profundidad, por ejemplo en Cortijo 5 Hermanos se tienen 236 m y en la entrada de La Florida 52 m.

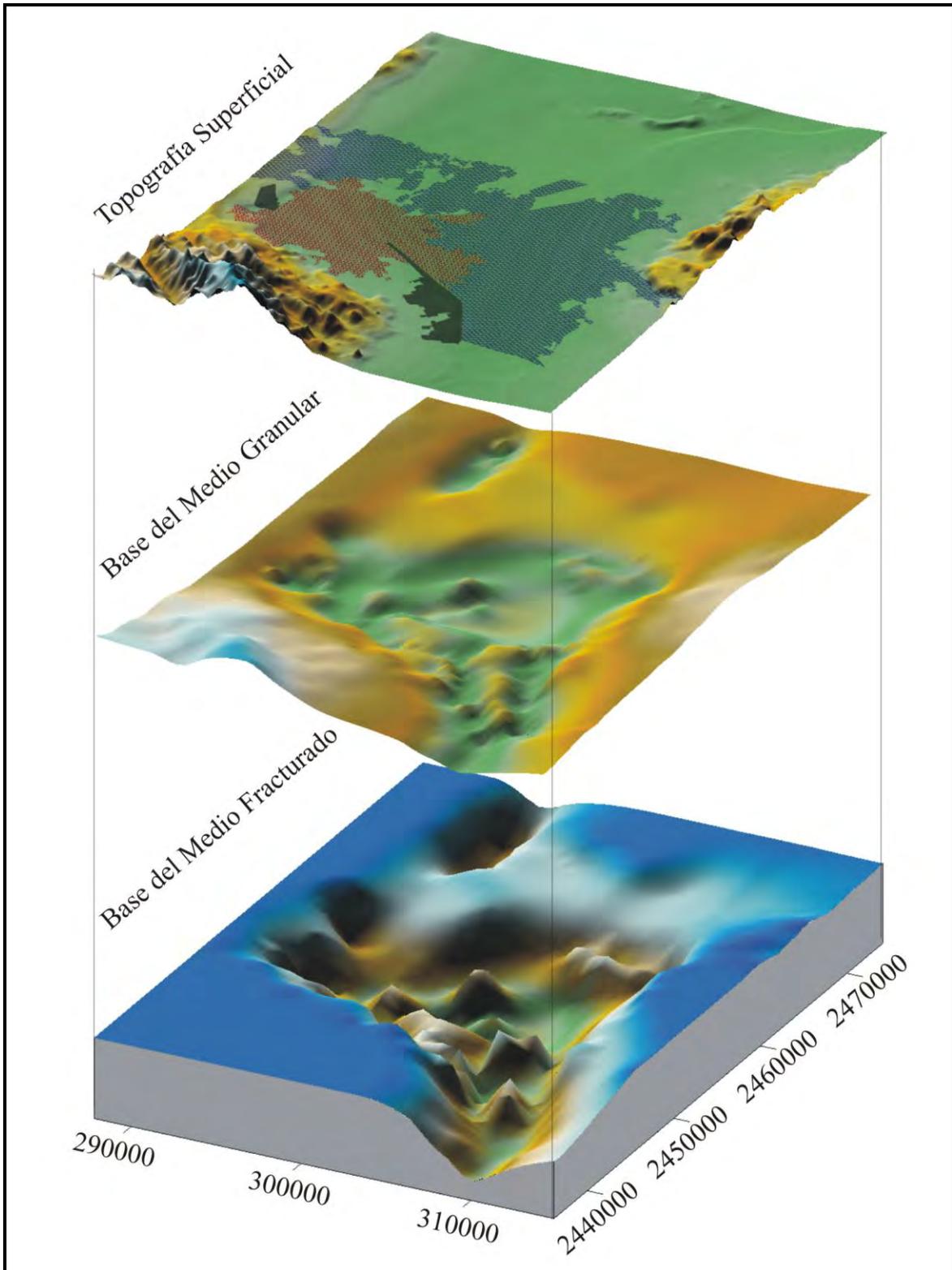


Figura 5. Geometría del sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí.

La región de Rinconada cuenta con un alto estructural de Latita Portezuelo aflorando en diversos cerros que sobresalen en el valle, material que sirve de frontera entre las dos depresiones tectónicas. En el poblado Los Moreno, al oeste de Rinconada la latita se encuentra cubierta por material aluvial con espesores de entre 75 y 80 m.

## 5. Sistema Acuífero del Valle de San Luis Potosí

El Sistema Acuífero del Valle de San Luis Potosí consiste en dos acuíferos denominados tradicionalmente como somero (granular) y profundo (volcánico fracturado) separados por un estrato de arena fina compacta de baja conductividad hidráulica (Cardona, 1990; Carrillo-Rivera, 1992; Carrillo-Rivera *et al.*, 1996). Como parte del acuífero granular se encuentra un acuífero de tipo colgado, siendo éste quien recibe directamente los efectos de la actividad humana.

*Acuífero colgado.* El acuífero colgado es muy superficial, tiene una profundidad menor a 40 metros (COTAS, 2005). Presenta una extensión limitada (sólo en la zona urbana). El material que compone este acuífero tiene variaciones texturales, de tal manera que hacia la Sierra de San Miguelito, predominan conglomerados inmersos en un matriz areno arcillosa y hacia el noreste del valle este material se adelgaza y predominan limos y arenas. La dirección de flujo del acuífero colgado va de suroeste a noreste.

Es un estrato de baja conductividad hidráulica y se recarga a partir de la precipitación en el valle, de la recarga inducida de tipo difusa (ocasionalmente por la fuga de agua potable y drenaje) y por retornos de riego, por lo que su comportamiento es muy dinámico.

Debido a la poca profundidad a la que se encuentra y gran parte de los cultivos se irrigan con aguas negras municipales sin tratamiento, se ha detectado la presencia de contaminación en el agua subterránea por metales, orgánicos, inorgánicos y bacteriológicos (Carrillo-Rivera y Armienta, 1990; Cardona *et al.*, 2008; Morán-Ramírez, 2010; COTAS, 2010). Los flujos por retornos de riego, son responsables del deterioro de la calidad del agua subterránea en un gran número de países, en particular en regiones semiáridas y áridas (UNESCO, 2004).

Su recarga depende de condiciones de precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, vegetación, presencia de capa de suelo, pendiente del terreno y permeabilidad de las rocas. La principal recarga en el acuífero se efectúa en el flanco oriente del Valle de San Luis Potosí; así como, al Norte de la Sierra de San Miguelito hacia el Valle de Escalerillas (Ramos *et al.*, 2007). Hacia la localidad de La Palma, se ubica el límite del acuífero colgado, por lo cual el flujo de éste puede tener comunicación hidráulica con el acuífero somero del medio granular.

*Acuífero granular.* El acuífero somero o granular que rellenó las fosas tectónicas ha sido el más explotado. Las estructuras geológicas (fallas normales) controlan la distribución y espesor de ésta unidad acuífera; está compuesto principalmente por materiales clásticos del Terciario. El acuífero es actualmente explotado por pozos que alcanzan profundidades de hasta 350 metros de material sedimentario. Su límite superior se encuentra aproximadamente de 100 a 150 metros de profundidad. Es confinado en el centro del valle por una capa sedimentaria poco permeable. Su espesor va de 100 a 200 metros (IPICYT, 2007).

*Acuífero profundo.* El acuífero profundo formado por roca volcánica fracturada, tiene una distribución irregular debido a un sistema de fosas y pilares. El valle está limitado por la Sierra de San Miguelito, donde en otras condiciones geológicas la recarga es mínima, debido a la baja permeabilidad de las rocas que conforman esta sierra, y la Sierra de Álvarez, cuyo origen es roca caliza de muy baja permeabilidad con capacidad reducida para transmitir y almacenar agua, lo cual, limita también la recarga lateral a través de esta sierra.

Las unidades geológicas que constituyen el acuífero profundo tienen una distribución espacial más extensa que los límites de la cuenca superficial. Es de tipo confinado en la mayor parte del valle de SLP. La profundidad a la superficie potenciométrica es mayor a 150 m, dependiendo de la ubicación dentro la planicie. La mayoría de los pozos perforados en este acuífero, tienen profundidades del orden de 350-450 m; aunque existen algunos de 800-1000 metros. Algunos pozos pueden atravesar 100-300 m de tobas e ignimbritas interestratificadas con el relleno granular, o alcanzar las rocas volcánicas que subyacen el relleno de la fosa tectónica.

## **6. Diferencias químicas de la calidad del agua en el sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí**

En la descripción del sistema acuífero del VSLP, se estableció que no existe conexión entre el acuífero somero granular y profundo, ésta condición se describe a continuación, para cada acuífero, con base a evidencias químicas.

El acuífero colgado se presenta en depósitos aluviales (grava y arena) dando características al agua químicas específicas en base al material geológico (interacción agua roca); sin embargo, el proceso que ha regulado la calidad del agua del acuífero somero han sido las actividades antropogénicas a través de los retornos de riego; así como, canales sin revestimientos que conducen aguas residuales, fugas en las redes domiciliarias, basureros municipales, disposición inapropiada de residuos peligrosos (COTAS, 2005 SEMARNAT, 2008, Morán-Ramírez, 2010; IPICYT, 2010).

La presencia de flúor en el agua subterránea ha representado un problema para la población, en el acuífero somero no rebasan los límites permisibles por la NOM-127 SSAI-1994.

El proceso que regula las características químicas del acuífero profundo o fracturado es principalmente la interacción agua roca, una evidencia de esto son las altas concentraciones del flúor (Carrillo-Rivera y Cardona-Benavides, 2002) en la composición del agua que se extrae. Los muestreos realizados en el acuífero fracturado no han mostrado contaminación importante de tipo antropógena, y la reportada ha sido de tipo puntal asociada al deterioro, abandono e incluso mala construcción de los pozos que dan lugar a la captura de algún tipo de contaminante.

La presencia de elementos del flúor en el agua del acuífero fracturado se considera un contaminante de tipo natural en el flujo profundo (Carrillo-Rivera y Cardona-Benavides, 2002).

Adicionalmente a las evidencias químicas del agua de las dos unidades acuíferas están las edades del agua en el medio granular que van de 1300 a 2300 años y del medio fracturado que van de 5300 a 6300 años (Carrillo-Rivera *et al.*, 1992; Cardona *et al.*, 2006). La diferencia de edades se asocia a sistemas de flujo local para el acuífero somero y a flujo regional del acuífero profundo (Noyola *et al.*, 2009).

## 7. Bibliografía

- Cardona A. y Carrillo-Rivera José Joel, 2006; Hidrogeoquímica de sistemas de flujo intermedio que circulan por sedimentos continentales derivados de rocas riolíticas; Ingeniería Hidráulica en México; vol. XXI, pp 69-86.
- Cardona, A., 1990. Origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea del valle de San Luis Potosí: Su Relación con el Sistema de Flujo. Tesis de Maestría en Ciencias, Universidad Autónoma de Nuevo León, Fac. Ing. Civil. 97p.
- Carrillo–Rivera, J.J., Cardona-Benavides, A., Huizar–Álvarez, R. y Graniel-Castro, E., 2008. Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology*, 55, 303-319.
- Carrillo-Rivera, J.J. 1992. The hydrogeology of the San Luis Potosí Área, Mexico. Ph.D. thesis, University of London, U.K., 203 p.
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona-Benavides, A., Moss, D., 1996, Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México: *Journal of Hydrology*, 185, 23-44
- Carrillo-Rivera, J. J., Clark, I.D. y Fritz P., 1992, Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes: *Applied Hydrogeology*, 1, 35-48.
- Carrillo-Rivera J.J., Armienta, M.A., 1990. Diferenciación de la contaminación inorgánica en las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México: *Geofísica Internacional*, 28(4), 763-783.
- Castillo, A. del C., 2003. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la zona de San Luis Potosí-Villa de Reyes y su Relación con la Química del agua subterránea. Trabajo de Tesis, Facultad de Ingeniería, UASLP. 105 p.
- Comisión Nacional del Agua, 2011. Estadísticas del Agua en México, edición 2011.
- CNA (Comisión Nacional del Agua), 1996-a. Actualización Geohidrológica del Valle de San Luis Potosí. Informe inédito
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1996-b. Estudio Hidrogeológico de la Contaminación del Agua Subterránea en la Zona Industrial de San Luis Potosí, S. L. P. 4 Volúmenes.
- Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS) , 2005. Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 “San Luis Potosí” en el Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, reporte, 74 p.
- Consultores S. A., 1977. Estudio geohidrológico de evaluación y censo en los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, zona de San Luis Potosí, S.L.P. Contrato No. EIGZA-77-16G. Informe Interno Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 22 p.
- Difurt-Candelaria, A., Martínez-Ruiz, V. J. y Martínez, S., 1995. Calibración del Modelo Matemático del Acuífero Profundo del Valle de San Luis Potosí. Informe Técnico, Facultad de Ingeniería, UASLP.
- Espino, C., 2008. Red de monitoreo óptima de la carga hidráulica del acuífero somero de San Luis Potosí. Tesis de maestría. Unidad Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma de Zacatecas, 160 p.

- Hergt, 2009. Diseño optimizado de redes de monitoreo de la calidad del agua de los sistemas de flujo subterráneo en el acuífero 2411 "San Luis Potosí": Hacia un manejo sustentable. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Químicas, Ingeniería y Medicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 227 p
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. (IPICYT), 2007. Estudio hidrogeológico de la porción oriental del Valle de San Luis Potosí. Reporte técnico elaborado para el Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 174 p.
- Jiménez, B. y Marín, L., 2005. El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. Edición digital 2005, 404 p.
- Kohn-Ledesma, I., 2009. Modelo de flujo del acuífero de San Luis Potosí, SLP. Universidad Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría, 118 p.
- Labarthe, H. G. y Tristán, G. M, 1978. Cartografía Geológica San Luis Potosí. Folleto Técnico No. 59, Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP.
- López-Álvarez, 2008. Diseño óptimo de la red de monitoreo de carga hidráulica del acuífero profundo de San Luis Potosí. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 115 p.
- Martínez, V. J. y Aguirre, M. A., 1984. Comportamiento del Nivel Estático de Acuífero Profundo de la Cuenca de San Luis Potosí, Hasta Junio de 1984. Folleto Técnico No. 96, Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP.
- Martínez, V. J., 1986. Condiciones Geohidrológicas Actuales del Valle de San Luis Potosí, Hasta Junio de 1984. Folleto Técnico No. 105, Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP.
- Medina, F., 1961. Estudios geohidrológico y fisicoquímico de los suelos en el municipio de de Soledad de G. D., SLP (Mimeografiado). Instituto de Zonas Desérticas. San Luis Potosí. 39 p.
- Medina F., 1974. Una Solución al Problema del Agua en San Luis Potosí, S.L.P. Folleto Técnico No. 41, Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP.
- Moran-Ramírez, J., 2010. Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura, Área de Ciencias de Químico Biológicas, Universidad del Noreste, 68 p.
- Ramos-Leal, J.A., López-Loera, H., Martínez-Ruiz, V.J., Aranda-Gómez, J.J., 2007. Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, Mexico) inferida a partir de datos geoelectrónicos: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24, 31-46.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Comisión Nacional del Agua (CNA) y Universidad Autónoma de México (UNAM), 1992. Modelación Matemática del Acuífero de San Luis Potosí, para Definir Políticas de Explotación, para Abastecimiento de Agua a la Ciudad de San Luis Potosí. 74 p.
- Stretta, E.J.P. y Del Arenal, R., 1960. Estudio para el abastecimiento de agua potable para la Ciudad de San Luis Potosí. Applied Sciences Institute, Hydrology Section, UNESCO and Instituto de Geofísica, UNAM. Internal Report, January, 40 p.

## GENERALIDADES

- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2004. Groundwater contamination Inventory: a methodological guide. Project 3.1 (IHP-V), 162 p.
- UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), 2006. Programa Mundial de los Recursos Hídricos.
- Urbina-Soria, J. y Martínez-Fernández, J., 2006. Más allá del cambio climático. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y Facultad de Psicología. 287 p.

**I** **ORIGEN DE LA CALIDAD  
DEL AGUA DEL ACUÍFERO  
COLGADO Y SU RELACIÓN  
CON LOS CAMBIOS DE USO  
DE SUELO EN EL VALLE DE  
SAN LUIS POTOSÍ.**

## I.1. Introducción

Desde el siglo XVIII, pero más intensamente en los últimos 50 años, los seres humanos han transformado los ecosistemas del mundo más rápido y extensamente que en ningún otro periodo comparable de la historia. Ahora se reconoce que, aún cuando los cambios de uso de suelo ocurren a nivel local, pueden tener consecuencias globales en el ciclo hidrológico ya que se ha demostrado que la cantidad y calidad del agua dependen en gran parte del uso que se da al suelo en las áreas que captan, conducen, almacenan, proveen y renuevan el recurso hídrico (SEMARNAT, 2005). Sin embargo, como consecuencia del crecimiento poblacional y el desarrollo económico, se generan presiones que conducen a cambios en el uso del suelo de las cuencas (SEMARNAT, 2005).

La composición química de agua subterránea puede ser controlada por factores naturales o antropogénicos. Los naturales son el clima, su interacción con el medio geológico por el cual circula y el tiempo de residencia. Los antropogénicos están directamente relacionados con fuentes potenciales de contaminación asociadas a actividades humanas.

Diversas investigaciones han sido realizadas en varias partes del mundo orientadas a establecer la relación entre los usos de suelo y sus afectaciones en el agua subterránea (Irrig y Engrg, 1987; Dummer y Straaten, 1988; Charbonneau y Kondolf, 1993; Pradeep K. *et al.*, 2008; Cox, *et al.*, 1996; Barber *et al.*, 1996; Tongf1 y Chen, 2002; Liu, *et al.*, 2005).

Un ejemplo de las alteraciones a un sistema natural propiciadas por actividades antropogénicas es el VSLP, en donde los usos de suelo han constituido un factor de alto impacto tanto en el volumen como en la calidad del sistema acuífero, principalmente sobre el acuífero colgado, el cual recibe los efectos de las actividades antropogénicas. Los cambios de uso de suelo desde los primeros asentamientos humanos en el valle han propiciado un efecto de contaminación cruzada que vuelve más complejo el problema de contaminación en el agua subterránea.

A continuación se realiza una revisión histórica del VSLP a partir de la evolución los usos de suelo y su impacto sobre el acuífero colgado.

La historia del VSLP se remonta al siglo XVI, en la región conocida como la Gran Chichimeca, que era diversa tanto en grupos étnicos nómadas como en su clima, flora y fauna, geografía y relieve (Galván-Arellano, 1999). El agua estaba concentrada en algunos puntos y de las serranías bajaban arroyos naturales que temporalmente llevaban agua (Galván-Arellano, 1999). El ejemplo de este escenario lo era la subregión conocida como el Gran Tunal (hoy VSLP). Con el proceso de pacificación y colonización de los nativos, el descubrimiento de recursos mineros (yacimientos de oro y plata) en el llamado Cerro de San Pedro

Potosí y la presencia de cuerpos de agua en el valle, fue fundada la ciudad nombrada San Luis Minas del Potosí (SLMP), el 3 de Noviembre de 1592.

La minería fue el principal detonador del crecimiento y desarrollo de la nueva población, y además la causa de grandes modificaciones del entorno. Por ejemplo, una gran deforestación de las serranías próximas, debido a la explotación de leña como combustible para atender la demanda de la minería y de la población. La agricultura fue la segunda actividad económica que más adelante representaría un factor de impacto importante en la calidad del agua, no sólo superficial sino subterránea, esta actividad se desarrollaba dentro de la zona urbana a través de huertos a partir del siglo XVII (Figura I.1). La tercera actividad económica fue la industrial, que surgió de manera importante en la segunda mitad del siglo XX.

Con la urbanización se generaron alteraciones al sistema hidrológico, una muestra de ello fueron las grandes inundaciones que se registraron desde los primeros años de la fundación de la ciudad de SLMP. Lo que propicio la construcción de una obra de desvío llamada “la corriente”, en 1688. Ésta, desalojaba a las aguas que bajaban de la Sierra de San Miguelito (SSM) e inundaban a la ciudad. Una segunda obra de desvío fue realizada en 1771. Ambas obras funcionaron hasta 1946 (De la Rosa-Charcas, 2000).

Desde su fundación, la ciudad de SLP, se abastecía de fuentes de agua superficiales: pequeños manantiales, ríos, arroyos, incluso de charcos que se formaban en temporadas de lluvia, teniendo un ecosistema aún en equilibrio. Al agotarse las fuentes de abastecimiento inmediatas en el valle, fueron necesarias obras hidráulicas para dar abasto a la ciudad en constante crecimiento, como el acueducto y las “conservas” (cajas de agua) y la presa San José.

El acueducto fue construido en 1831 llevando agua de la SSM a “las conservas”, obras construidas en 1835 destinadas a almacenar agua sirviendo para el abastecimiento público y funcionaron hasta la primera mitad del siglo XX. La presa San José comenzó a funcionar en 1903 y en la actualidad es la principal fuente de abasto de agua superficial para la zona conurbada del VSLP, aprovechando las afluentes del Río Santiago.

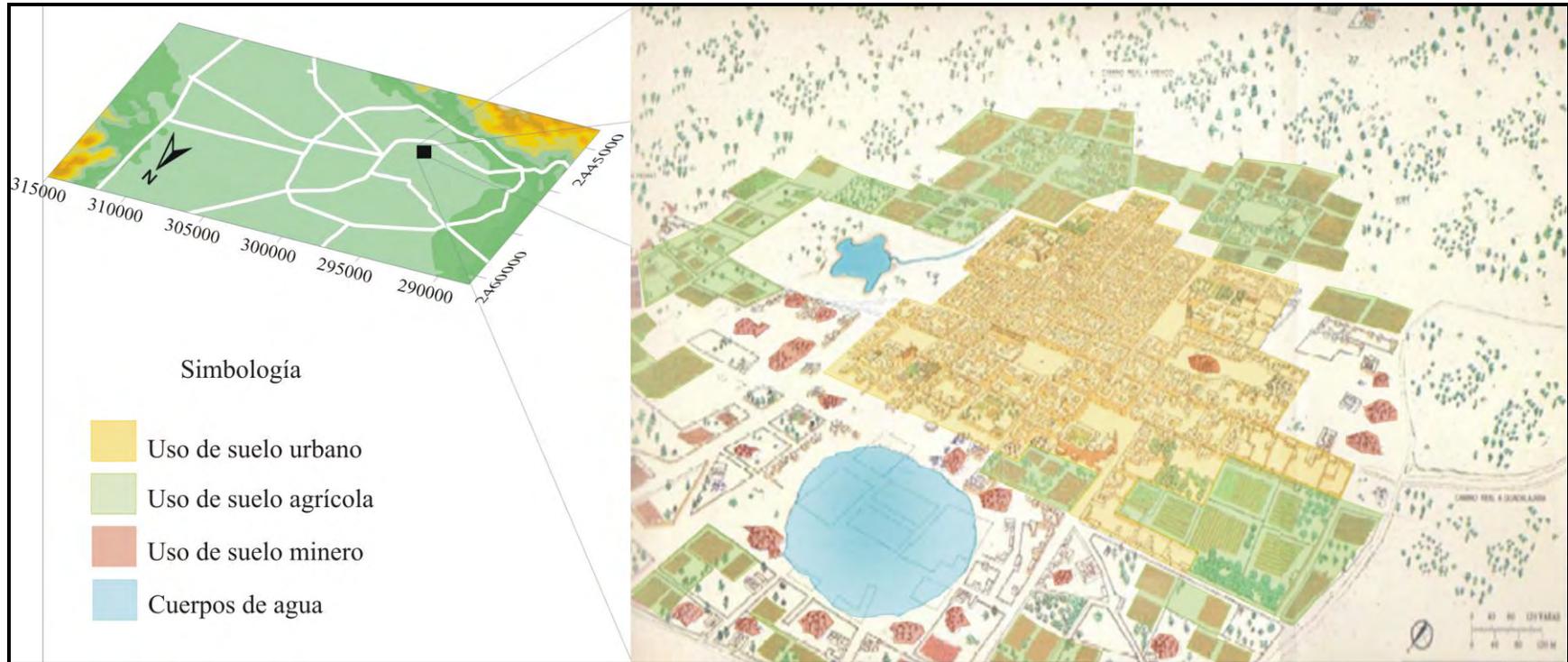


Figura I.1. Primeros usos de suelo en la ciudad de San Luis Potosí en el siglo XVII.

En el siglo XIX, se dio inicio al uso activo de agua subterránea como fuente de abastecimiento. Desde inicios de éste siglo, las norias daban servicio a la población para uso doméstico e irrigación de pequeños huertos (Sheridan-Prieto, 2001).

Hasta mediados del siglo pasado los cambios sufridos en el VSLP habían sido relativamente paulatinos. Sin embargo, a cuatros siglos de la fundación de la ciudad de SLP se han experimentado cambios muy drásticos en los usos de suelo que a su vez han tenido un gran impacto en el sistema hidrológico en los últimos 50 años.

La zona conurbada del VSLP formada por los municipios de SLP y Soledad de Graciano Sánchez (SGS), incrementó 15 veces su tamaño de 1959 a 2005 (Figura I.2), registrándose el cambio de superficie urbana más importante entre 1970 y 1993 al cuadruplicarse (Noyola *et al.*, 2009). En cuanto a la población de éstos dos municipios, para el año 2000 equivalían al 38% de la población total de Estado. En base al último censo poblacional (INEGI, 2010), representan 40% de la población total estatal.

## **I.2. Metodología**

La campaña de muestro hidrogeoquímico se realizó en Octubre de 2008 con 47 muestras dentro del VSLP, 3 de ellas corresponden a manantiales y el resto a norias. El muestreo se realizó en el acuífero colgado a una profundidad promedio de 8.6 m, teniendo un mínimo de 0.3 m y un máximo de 28 m.

Los parámetros físico-químicos como temperatura, pH, alcalinidad, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y potencial redox fueron medidos en el sitio de muestreo. Las muestras tomadas para cationes y elementos traza, se acidificadas con HNO<sub>3</sub> concentrado para llevarlo a un pH < 2. A las muestras para aniones no se les realizó este procedimiento. La preservación del total de las muestras se dio a una temperatura menor a 4°C.

Los iones mayores y elementos traza fueron enviados a laboratorio de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, los cuales fueron determinados por ICPOES y los aniones (sulfatos y cloruros) por colorimetría en el IPICYT, y la alcalinidad por titulación en campo. El balance iónico de los datos químicos tuvo un error menor al 10%. Los datos de hidrogeoquímica de nitratos (NO<sub>3</sub>), sulfatos (SO<sub>4</sub>), cloruros (Cl), Conductividad eléctrica (CE), grasas y aceites (GA), coliformes totales (CT), flúor (F), arsénico (As) estroncio (Sr), bario (Ba), fierro (Fe), níquel (Ni), aluminio (Al) cobre (Cu), mercurio (Hg), plata (Ag), plomo (Pb), manganeso (Mn), zinc (Zn), cromo (Cr), boro (B), cobalto (Co), cadmio (Cd), rubidio (Rb) y litio (Li) del agua subterránea fueron usados en diagramas distribución espacial para evaluar su comportamiento en el VSLP (Anexo A).

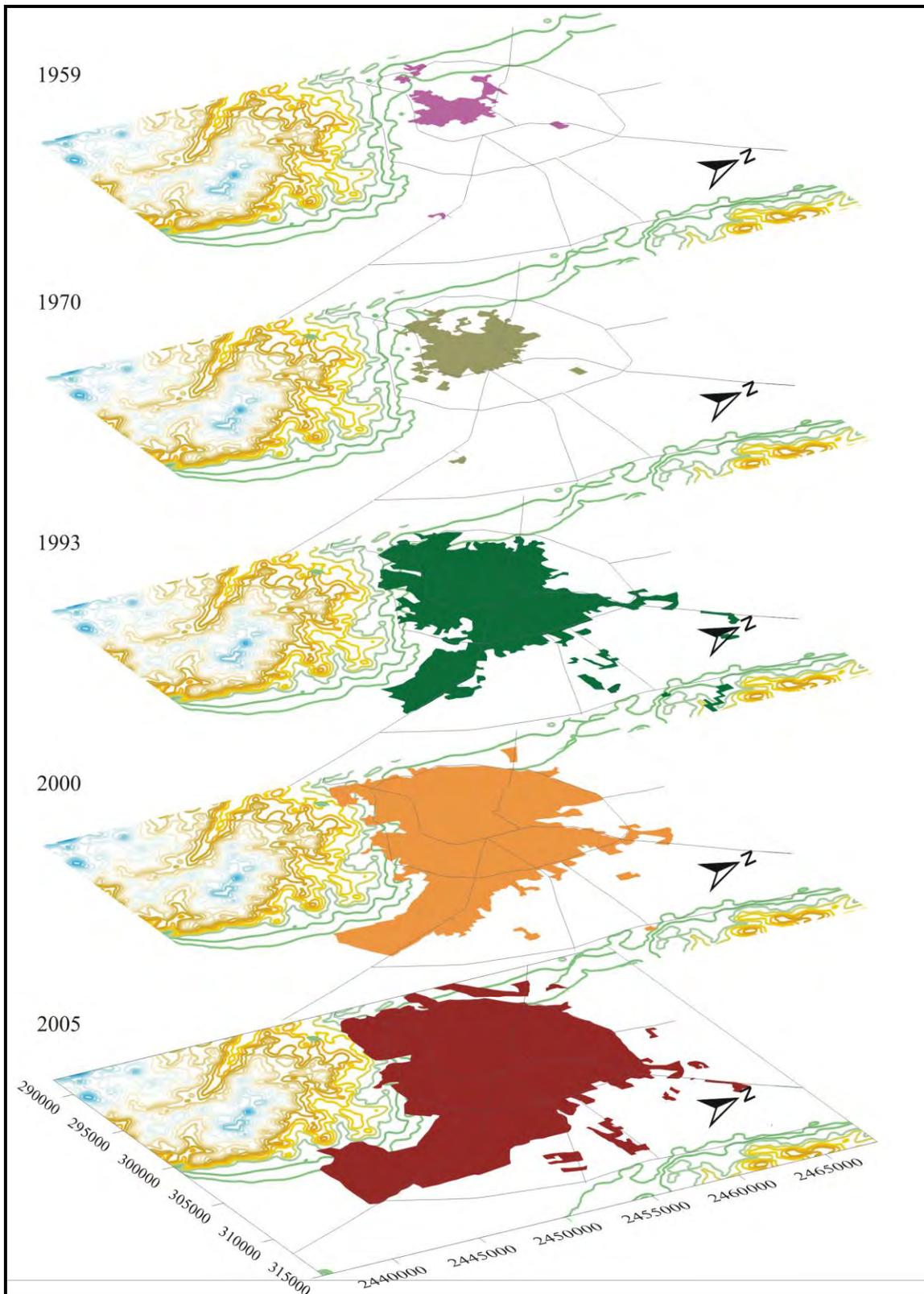


Figura I.2. Crecimiento de la mancha urbana de 1959 a 2005, (modificada de Noyola *et al.*, 2009)

### **I.3. Resultados y discusión**

#### **I.3.1. Evolución del cambio de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí**

Como consecuencia de los primeros asentamientos humanos en el valle a mediados del siglo XVI, se da inicio a los dos primeros usos de suelo (urbano y minero) en el actual VSLP. El uso de suelo urbano generó agua residuales domésticas que eran vertidas en corrientes naturales y canales abiertos.

Aunque la extracción de minerales se desarrollaba en el Cerro de San Pedro, el procesamiento de los minerales se llevaba a cabo en patios de beneficio en el centro de la actual ciudad de SLP (Figura I.1), debido a que allí era donde existían los pequeños manantiales y corrientes como la del llamado Río de Santiago (hoy Río Santiago). Los residuos que se generaban de ésta actividad eran depositados en patios de beneficio dentro de la zona urbana sin algún tipo de manejo apropiado (Figura I.1), trayendo como consecuencia la lixiviación de los residuos mineros (Keiser-Schlittler, 1992; Galván-Arellano, 1999; IMPLAN, 2009-2012). La ciudad en constante crecimiento desplazó a ésta actividad hacia la periferia; sin embargo, sus residuos quedaron en un principio abandonados, luego sepultados y/o distribuidos en la ciudad para ser ocupados principalmente como relleno de calles.

La agricultura desarrollada de manera importante en el siglo XVII a través de pequeños huertos familiares (Figura I.1) en sus inicios, no representó un agente de alto impacto; sin embargo, se convirtió en un factor de alteración cuando comenzó a recibir las aguas residuales que generaba la ciudad. Un caso muy particular es el sitio conocida como Tanque Tenorio (ubicado al oriente de la ciudad) que originalmente era una depresión natural donde se formaba un cuerpo de agua intermitente. Desde los años setenta del siglo pasado, se comenzó a usar para descargar aguas residuales industriales y en menor medida domésticas, en forma continua (Medellín-Milán, 2003). Estas aguas han sido aprovechadas desde entonces para riego en la zona agrícola y por su origen impactan al acuífero colgado (Moran-Ramírez, 2010; COTAS, 2010).

La industria surgió de manera importante en la segunda mitad del siglo XX, junto con éste, el crecimiento de la superficie urbana multiplicó su superficie rápidamente de 1760 hectáreas en 1960 a 14 mil hectáreas en el año 2000 (Figura I.2), otro evento fue el auge de la diversificación e intensificación industrial (SEMARNAT, 2008).

La consecuencia inmediata del crecimiento industrial fue la instauración de nuevas áreas de vivienda para aquellas familias que llegaron a la ciudad en busca de fuentes de empleo. La mancha urbana se extendió principalmente sobre terrenos yermos y comenzó un desplazamiento importante de los cultivos periurbanos (Figura I.2), generando aguas residuales domésticas que son utilizadas en la zona agrícola. En tanto que la industria genera aguas residuales industriales sin tratamiento y utilizadas en la agricultura.

El cambio de uso de suelo significó modificaciones al sistema acuífero en cantidad y calidad. De tal manera que la actividad agrícola demanda volúmenes de agua de forma cíclica, mientras que los nuevos usos del suelo (industrial, habitacional y comercial) demanda un volumen constante y abasto permanente (SEMARNAT, 2008).

Un indicador del impacto del cambio de uso de suelo es el origen del agua para abastecimiento de la ciudad. En 1960, el 59% del agua era de origen superficial y 41% de subterráneo, pero para 2005 la proporción cambio drásticamente a 8% de origen superficial y 92% de origen subterráneo generando una dependencia creciente y acelerada del acuífero profundo (COTAS, 2005).

En cuanto a calidad se refiere, en los primeros asentamientos humanos se utilizaba agua superficial de buena calidad acumulada en los pequeños manantiales. Posteriormente en la primera mitad del siglo XX, una parte de la población se abastecía directamente de norias que eran utilizadas simultáneamente para el riego de huertas y el uso doméstico (Sheridan-Prieto, 2001); sin embargo, los cambios en el uso del suelo extinguieron los huertos que existían dentro de la ciudad, originando una competencia por el agua de mejor calidad, convirtiendo a las norias en la fuente principal para la agricultura y las extracciones del acuífero profundo se destinaron principalmente a los usos doméstico, comercial e industrial.

En la actualidad, la agricultura recibe las descargas de aguas residuales domésticas e industriales que son conducidas por canales a cielo abierto contribuyendo con un impacto directo sobre el acuífero colgado.

### **1.3.2. Fuentes Contaminantes del Agua Subterránea en el Valle de San Luis Potosí**

Aunque existe una gran cantidad de actividades humanas que generan cierta carga contaminante, sólo un pequeño número de éstas se pueden considerar como tal (Ramos-Leal, 2002). Dependiendo de los mecanismos de control primario de cada actividad, éstas se pueden clasificar como fuentes potenciales y activas (Wilson, 1991), las primeras no están de hecho contaminando, pero representan un riesgo; las segundas son aquellas en las que los mecanismos de control primario han fallado y por lo tanto, representan una fuente contaminante activa.

Se considera como fuente de contaminación del acuífero al sitio que genera lixiviados o solutos y que al ser incorporados al sistema acuífero, alteran la calidad natural del agua subterránea (Figura 1.3). La calidad del agua subterránea está definida por los valores de fondo de los elementos que de manera natural se incorporan al flujo subterráneo, estas concentraciones no necesariamente tienen que estar por debajo de la normatividad vigente para agua potable.

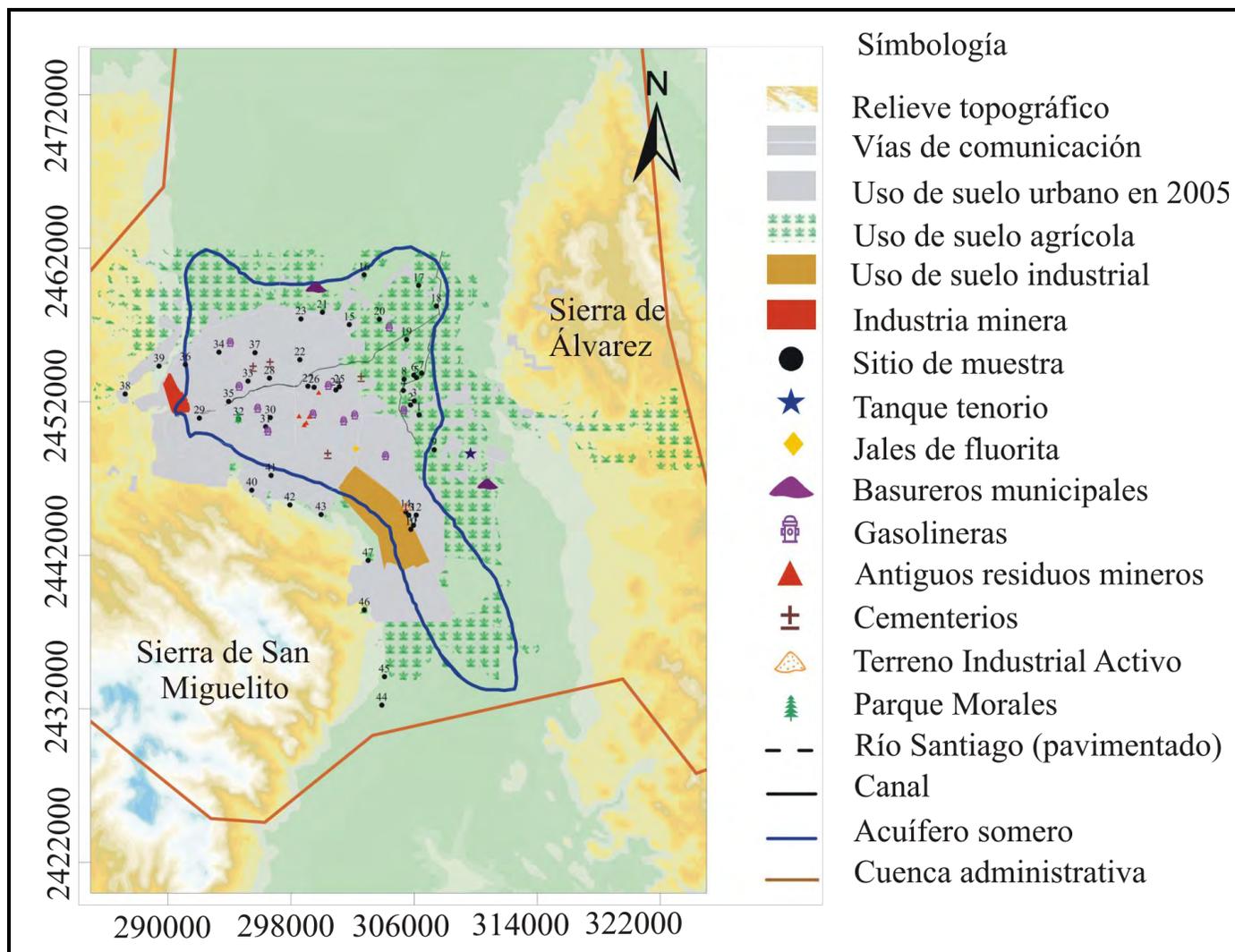


Figura I.3. Fuentes potenciales de contaminación y usos de suelo del área de estudio.

### I.3.3. Tipo de fuentes potenciales de contaminación

En el Valle de San Luis Potosí las fuentes contaminantes pueden ser caracterizadas por su origen, geometría, actividad o temporalidad (Tablas I.1, I.2, I.3 y I.4).

Tabla I.1.- Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su origen, geometría, actividad y temporalidad (Fetter, 1999).

<b>Origen</b>	Natural	Antropogénico	
<b>Geometría</b>	Puntual	Lineal	Difusa
<b>Actividad</b>	Activa	Potencial	Inactiva
<b>Temporalidad</b>	Pulso	Intermitente	Permanente

Tabla I.2.- Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona urbana de San Luis Potosí.

Tipo de fuente	Actividad	Origen	Geometría	Temporalidad	Soluto	Uso de Suelo
Zona urbana	Activa	Antropogénico	Difusa	Permanente	Nitratos, SDT.	Zona Urbana
Panteones	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Aminas, Ca, P	Zona Urbana
Jales Mineros	Activa/potencial	Antropogénico	Difusa	Intermitente	F	Zona Urbana
Descargas de aguas residuales	Activa/potencial	Antropogénico	Puntual/lineal	Intermitente	SDT, Cl, N, Comp. Org.	Zona Urbana
Disposición de residuos sólidos	Activa/potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Metales	Zona Urbana Zona Agrícola
Formaciones Geológicas	Activa/potencial	Natural	Difusa	Intermitente	Cr, F, As	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Industrial
Gasolineras	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	BTEX	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Industrial

Fuente: Ramos-Leal, 2002.

Tabla I.3.- Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona agrícola de San Luis Potosí- Soledad de Graciano Sánchez.

Tipo de fuente	Actividad	Origen	Geometría	Temporalidad	Soluto	Uso de Suelo
Terrenos agrícolas	Activa	Antropogénico	Difusa	Intermitente	Agroquímicos	Zona Agrícola
Basureros activos	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Nitratos STD, Comp. Org.	Zona Agrícola
Basureros clausurados	Activa/potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Nitratos SDT, Comp. Org.	Zona Agrícola
Ríos y canales de aguas residuales	Activa	Antropogénico	Lineal	Intermitente	SDT, Cl, N, Cr	Zona Agrícola
Granjas	Potencial	Antropogénico	Difusa	Intermitente	Nitratos	Zona Agrícola
Disposición de residuos sólidos	Activa/potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Metales	Zona Urbana Zona Agrícola
Gasolineras	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	BTEX	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Industrial

Fuente: Ramos-Leal, 2002.

Tabla I.4.- Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona industrial de San Luis Potosí.

Tipo de fuente	Actividad	Origen	Geometría	Temporalidad	Soluto	Uso de Suelo
Disposición de lodos industriales	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Comp. Orgánicos, metales, sust. corrosivas	Zona Industrial
Confinamiento de residuos industriales	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Metales	Zona Industrial
Terrenos industriales activos	Activa/potencial	Antropogénico	Puntual	Pulso/intermitente	Metales, comp. orgánicos	Zona Industrial
Terrenos industriales inactivos	Potencial	Antropogénico	Puntual/Difusa	Intermitente	Metales, comp. orgánicos	Zona Industrial
Gasolineras	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	BTEX	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Industrial

Fuente: Ramos-Leal, 2002.

### 1.3.1. Origen

La contaminación puede ser de tipo natural o antropogénica, se considera *antropogénica*, cuando está asociado a alguna actividad humana (Fetter, 1999).

El acuífero colgado puede ser categorizado como urbano debido a que una superficie importante del acuífero se encuentra debajo de los tres principales usos de suelo (urbano, industrial y agrícola) por lo tanto el origen de la contaminación está asociada a las actividades humanas y su condición estará directamente afectada por la dinámica y el tipo de crecimiento urbano (Peña, 2006).

Cuando la contaminación no está asociada con actividades humanas su origen es *natural*, como en el caso de la lixiviación de rocas y suelos (Fetter, 1999; Armienta *et al.* 1996; Robles y Armienta, 2000). En el caso del agua subterránea, para el acuífero profundo, en el área de estudio se han reportado niveles de flúor por encima de la norma (COTAS, 2005; Ramos-Leal, 2002; Cardona, 2007; Carrillo-Rivera, 2002), cuyo origen es asociado con las rocas volcánicas que forman el acuífero. En el caso del acuífero colgado los niveles de flúor son bajos con respecto a la NOM-127 SSAI-1994.

Las anomalías encontradas pueden ser causadas en primer lugar a la disposición de residuos de flúor y en segundo, a talleres de soldadura, en donde se emplea como fundente (Bateman, 1974).

Las anomalías de  $As^{+3}$ ,  $Li^{+}$  y los valores de F que sobrepasan la NOM-127 SSAI-1994 en el acuífero profundo están asociadas al medio geológico (COTAS, 2005; Cardona, 2007; Carrillo-Rivera, 2002), mientras que para el agua del acuífero colgado, las concentraciones son bajas y las anomalías pueden estar asociados a actividades antropogénicas.

### **1.3.3.2. Geometría**

De acuerdo a su geometría, una fuente es *puntual* cuando dependiendo de la escala a la que se trabaje, ésta puede ser representada por un punto en el espacio. En el área de estudio este tipo de contaminación es generada por los patios de beneficio minero en el siglo XVII en la zona urbana; en la actualidad algunos puntos en la zona industrial muestran éste comportamiento.

Si la representación es una línea o una sucesión de puntos, será *lineal* como en el caso los canales a cielo abierto en la zona agrícola de SGS y los ríos Santiago y Española en la zona urbana.

Si la fuente se encuentra dispersa en la zona de estudio o si la generación de lixiviaciones tiene lugar en más de dos puntos, por su geometría se le considera como *difusa*. Éste tipo de geometría es la presentada por  $NO_3^{-2}$ ,  $SO_4^{-2}$ ,  $Cl^{-}$  y CE en la zona urbana y agrícola.

Otra fuente de contaminación de tipo difusa, es la generada por la dispersión de partículas atmosféricas, como las reportadas en la zona industrial en Aragón-Piña *et al.* (2006), partículas con un metal pesado dominante (partículas ricas en hierro, cobre, plomo, arsénico, zinc, níquel, estaño, aluminio, molibdeno y bismuto); así como, anomalías de partículas de fluorita, cuya abundancia se debe al manejo del mineral que es transportado hacia la Zona Industrial en donde se tritura y almacena al aire libre (Aragón-Piña *et al.*, 2006). Otro tipo de partículas reportadas por estos mismos autores, son de cobre metálico, sulfatos de plomo y trióxido de arsénico, relacionadas a la zona minero-metalúrgica, ubicada al NW de la ciudad.

### ***1.3.3.3. Actividad***

En caso de existir evidencias de la generación de lixiviaciones será *activa*, como es el caso de los usos de suelo actuales en donde la contaminación es permanente; un ejemplo de este tipo de actividad es la zona agrícola de SGS, a través de los canales y parcelas de riego. En la zona industrial es por medio de sus descargas.

Cuando existen o pueden existir elementos suficientes para que se generen lixiviaciones en un futuro inmediato o a largo plazo será contaminación de tipo *potencial*. En zonas urbanas los tiraderos clandestinos y la disposición de residuos de flúor en la zona urbana.

Las fuentes *inactivas* aunque pueden ya no estar en uso, siguen representando un riesgo potencial. Tal es el caso de los patios de beneficio minero del siglo XVII en la zona urbana (Figura I.1) y el antiguo Tanque Tenorio (Keiser-Schlittler, 1992; Galván-Arellano, 1999; Medellín-Milán, 2003; IMPLAN, 2009-2012).

### ***1.3.3.4. Temporalidad***

Cuando la generación de lixiviados es continua en el tiempo, se le definirá como *permanente*, como es el caso de los canales a cielo abierto en la zona agrícola.

Cuando los lixiviados solo están presentes cuando las condiciones de humedad en el sitio lo permiten (lluvias e incremento de humedad) será *intermitente* como es el caso de los ríos Santiago y Española. Otro caso los son los residuos sólidos mineros sepultados en la zona urbana, los cuales generan lixiviados en temporada de lluvias y cuando el nivel freático se eleva éstos son incorporados al acuífero.

Cuando los lixiviados sólo ocurren una ocasión, su carácter temporal será de *pulso*. Debido a que en el área de estudio el nivel freático está muy cercano a la superficie, el acuífero es muy vulnerable a la contaminación. Bajo estas condiciones en época de estiaje, los valores de contaminantes se incrementan y en época de lluvia son incorporados y diluidos en el acuífero.

Los cambios de uso de suelo en la zona de estudio y sus efectos se aprecian en la Figura I.4, para el año 1989 la distribución de  $\text{NO}_3$  era principalmente en la zona agrícola; para 1995 además del crecimiento del uso de suelo urbano es apreciable el incremento de la marcha de este contaminante. En 2009 la distribución de  $\text{NO}_3$ , permanece en la zona agrícola además de encontrarse de manera importante en la zona urbana, como producto de los desechos humanos.

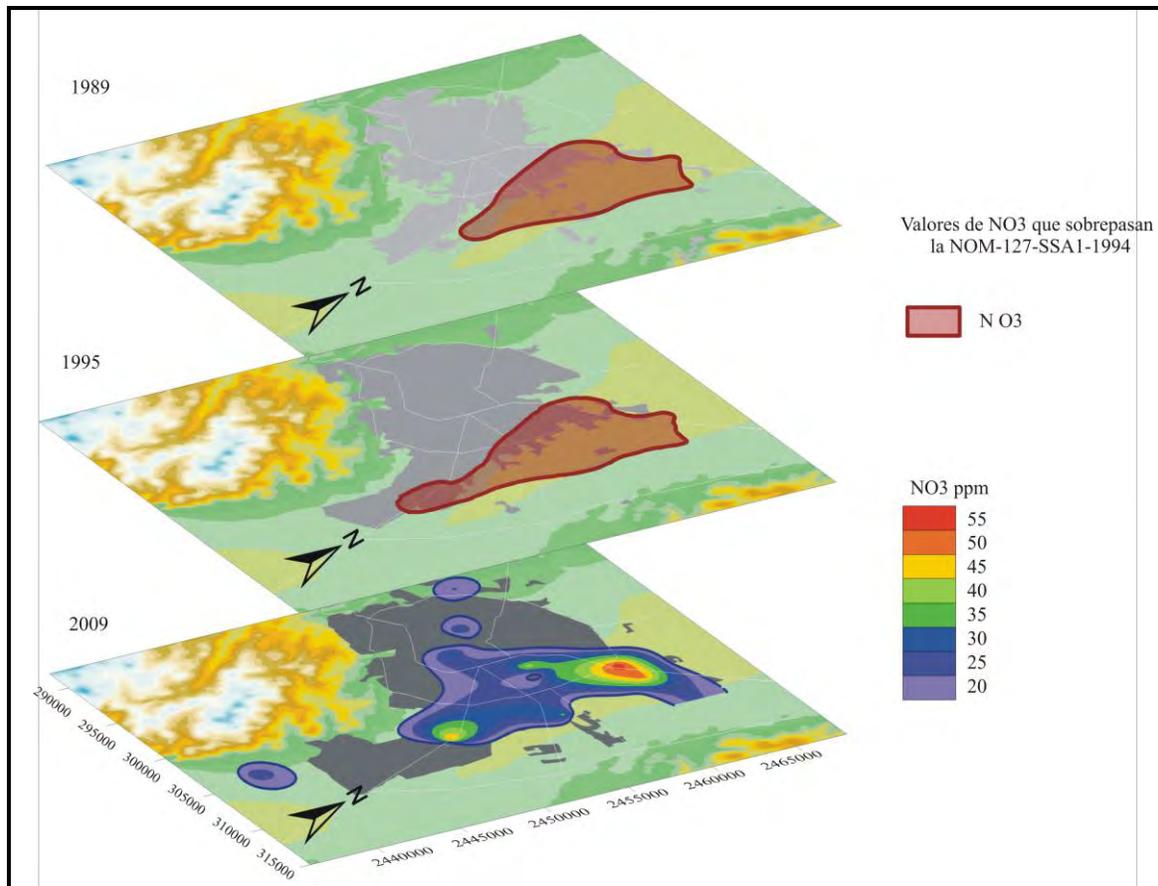


Figura I.4. Distribución temporal de NO<sub>3</sub> en la zona de estudio, basados en datos de Moran-Ramírez, 2010; COTAS, 2005).

### ***1.3.3.5. Contaminación en zonas urbanas***

Entre las fuentes potenciales de contaminación que existen en la zona urbana y conurbada de SLP se encuentran panteones, jales mineros, descargas de aguas residuales, disposición de residuos sólidos (activos e inactivos), gasolineras y formaciones geológicas que aportan en la región Flúor (Figura I.3; Tabla I.2). Derivado de estas fuentes potenciales de contaminación, en el acuífero colgado de la zona urbana se detectaron niveles importantes de NO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl, CE, CT, GA que por su amplia distribución en esta zona, se considera que estas fuentes potenciales de contaminación son de tipo difusa (Moran-Ramírez, 2010). Anomalías importantes en la zona urbana se localizan en norias en el caso de los NO<sub>3</sub> y CT, rebasa el límite permisible para consumo humano de la NOM-127 SSAI-1994. La principal área contaminada de estos parámetros se encuentra en las proximidades del panteón municipal de SGS; así como, en la zona centro de la ciudad (Figura I.5a,b,c,d,e,f).

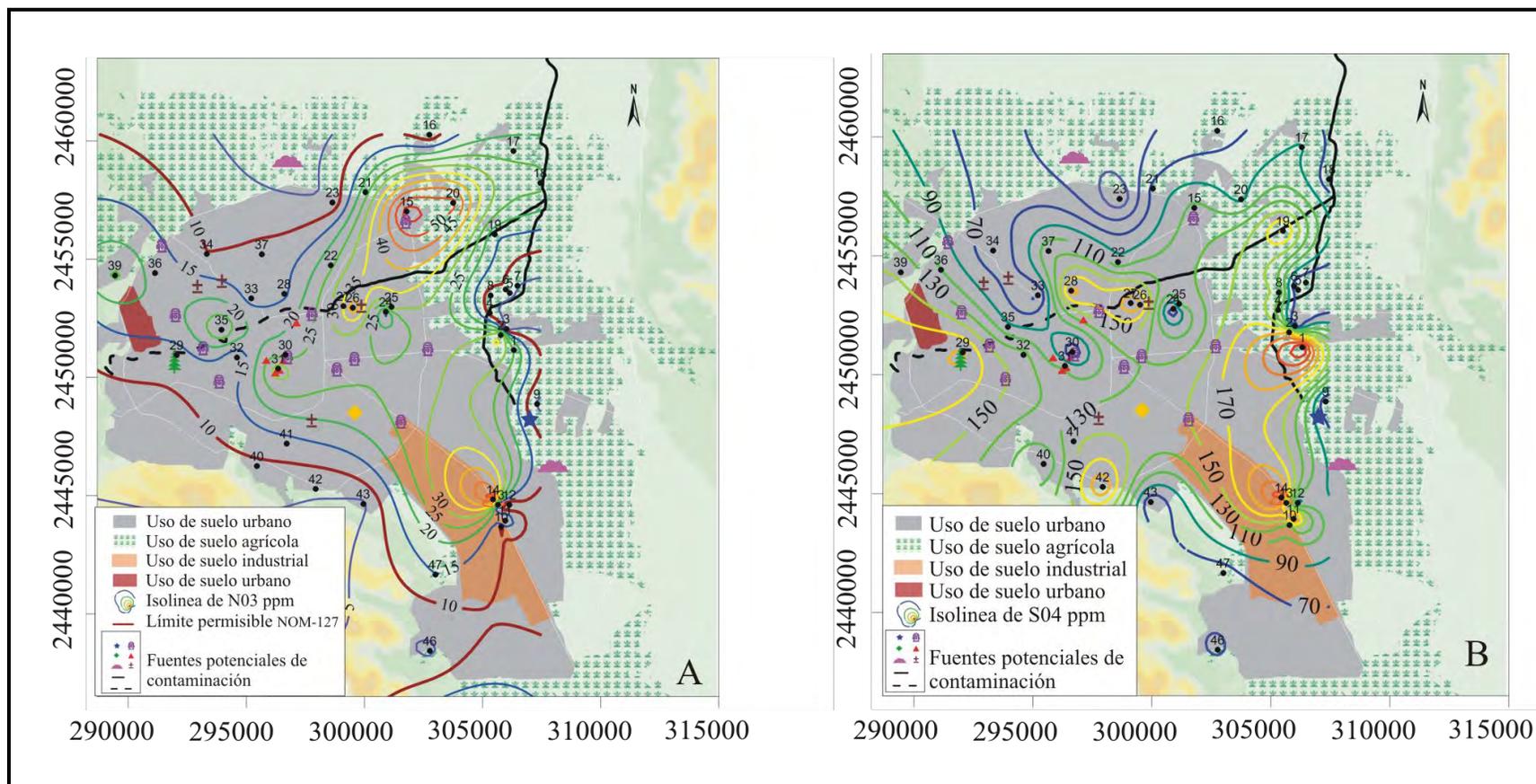


Figura I.5. Distribución espacial de a)  $\text{NO}_3$  (ppm), b)  $\text{SO}_4$  (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.

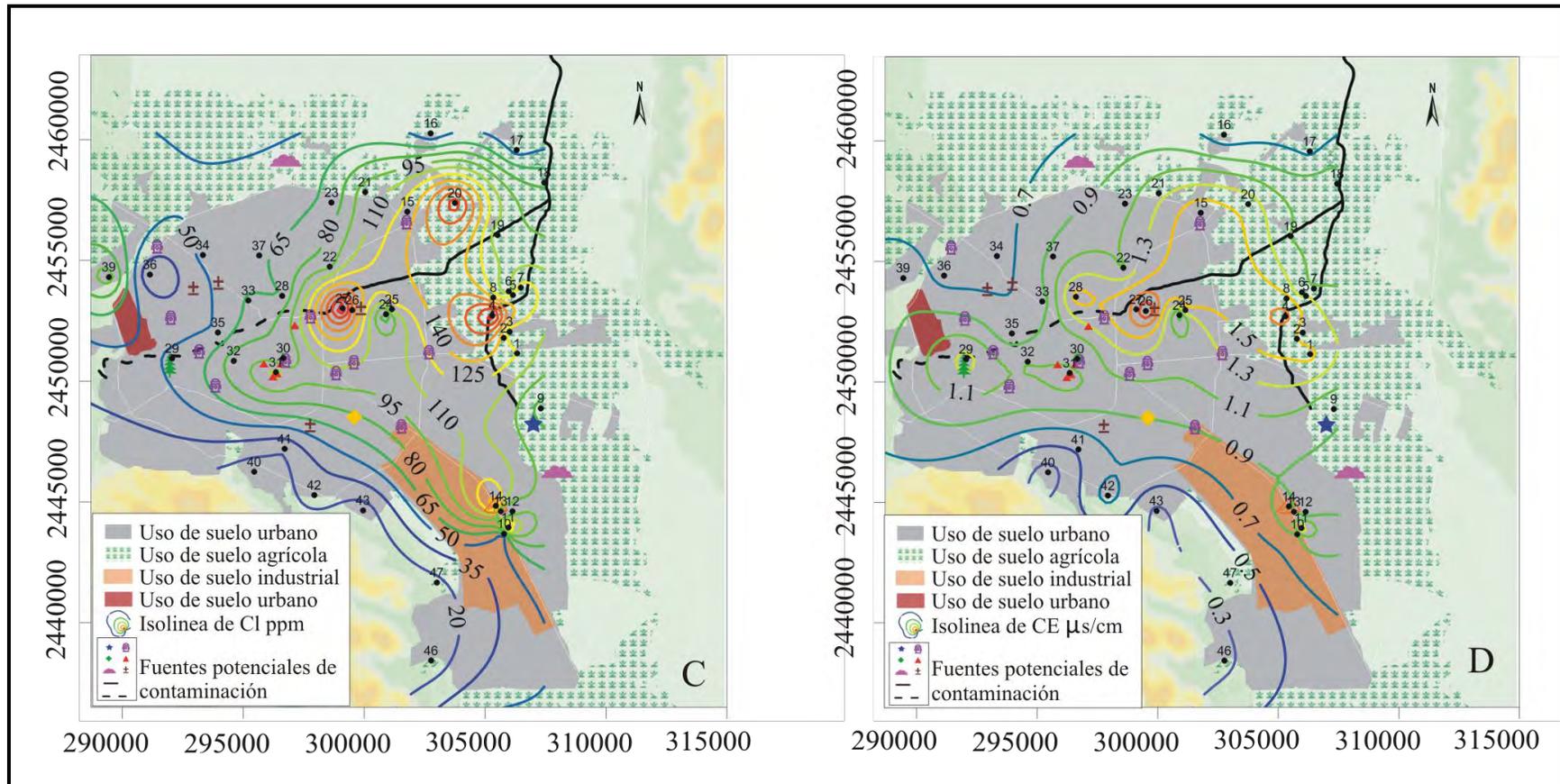


Figura I.5. Distribución espacial de c) Cl (ppm) y d) Conductividad Eléctrica ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), basados en Moran-Ramírez, 2010.

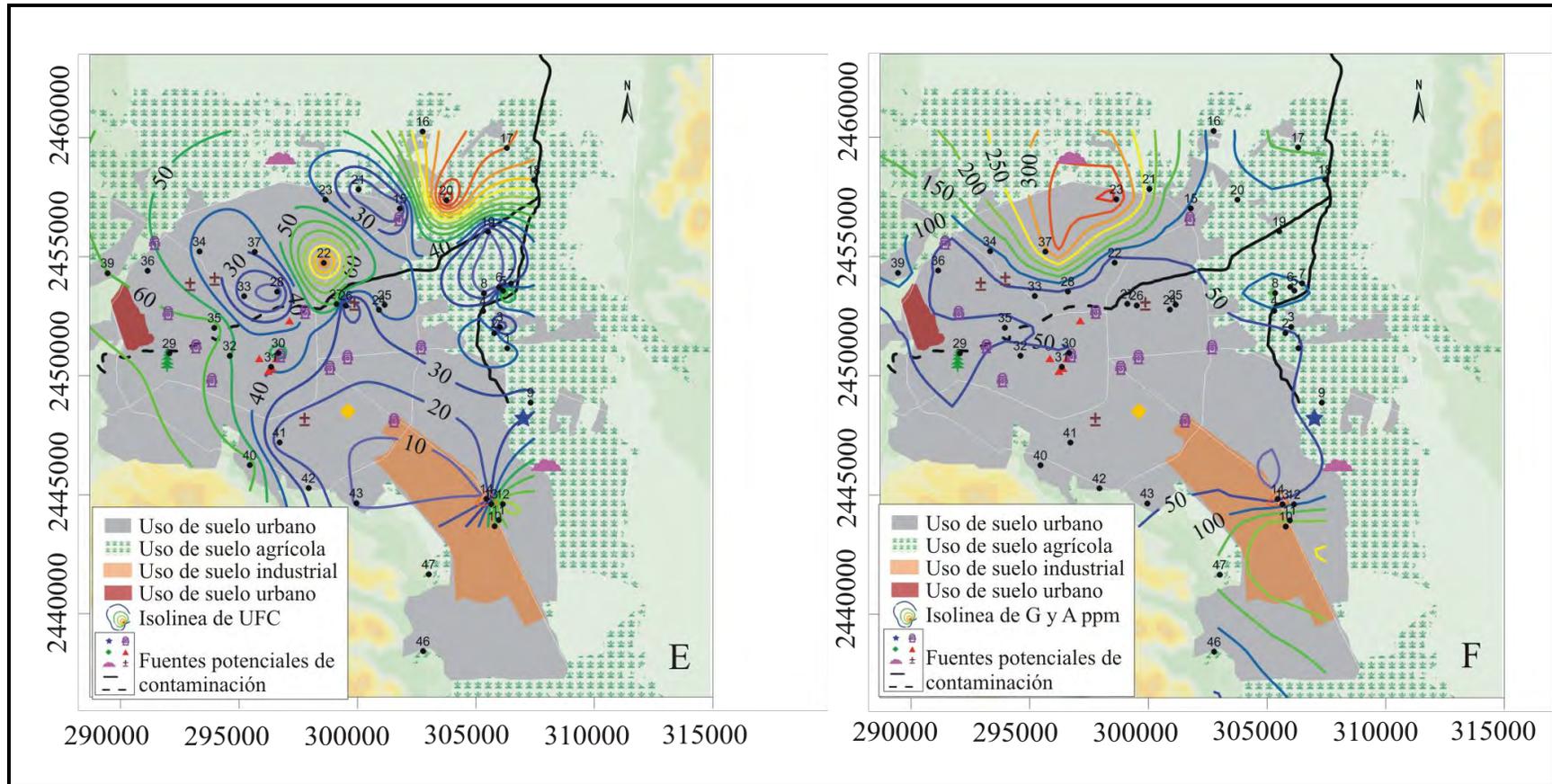


Figura I.5. Distribución espacial de e) Coliformes Totales (UFC) y f) Grasas y Aceites (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.

El acuífero colgado en la zona urbana recibe una importante recarga inducida ocasionado por las fugas en las redes de agua potable y de drenaje (COTAS, 2005), aportando cantidades significativas de éstos contaminantes al acuífero.

Como se ve en la Figura I.6, de manera puntual se identificaron fuentes de contaminación que generan Hg, Ba, Sr, Cd, Pb y Ag (Figura I.6a,b,c,d,e), siendo el primero de estos elementos el que sobrepasa el límite permisible para consumo humano de la NOM-127-SSA1-1994. En la Figura I.7, también se detectaron valores importantes de Rb, Co, Cu, Fe y As (Figura I.7a,b,c,d,e), siendo este último el que sobrepasa el límite permisible para consumo humano de la NOM-127-SSA1-1994.

Cabe mencionar que la presencia de metales pesados no es común en zonas urbanas; sin embargo, los niveles detectados en algunos sitios pueden estar relacionados a las actividades mineras realizadas a partir de la fundación de la ciudad en el Siglo XVII (Keiser-Schlittler, 1992; Galván-Arellano; 1999; IMPLAN, 2009-2012).

Otra fuente de estos metales puede ser la presencia de talleres dentro de la zona urbana; así como la dispersión aérea de partículas. Lo cual explica la distribución de diferentes metales reportados en el presente trabajo. Cabe mencionar que el Ba y Sr, también son utilizadas en la pirotecnia, actividad que ha sido reportada en la periferia de SLP (IMPLAN, 2009-2012).

El Mn se detectó en el Parque Morales (Figura I.8a,b,c,d,e,f), el cual se encuentra cercano a una zona de uso de suelo industrial minero, la cual actualmente emite partículas al ambiente durante sus procesos.

En el área de estudio, el comportamiento de las fuentes de contaminación es complejo. Generalmente pueden estar sujetos a procesos de atenuación natural (Gutiérrez-Ruiz et al., 2005); pueden ser transportados vía aérea (Aragón-Piña et al., 2006) y también pueden ser transportados por la acción fluvial.

Una vez que estos se depositan pueden ser afectados por el dinamismo del nivel freático del acuífero colgado, el cual es de poca profundidad, la carga contaminante puede ser transportada por el flujo subterráneo que va de SW a NE (COTA, 2005; IPICYT, 2010), de tal manera que pueden encontrarse anomalías en áreas diferentes a su sitio de origen.

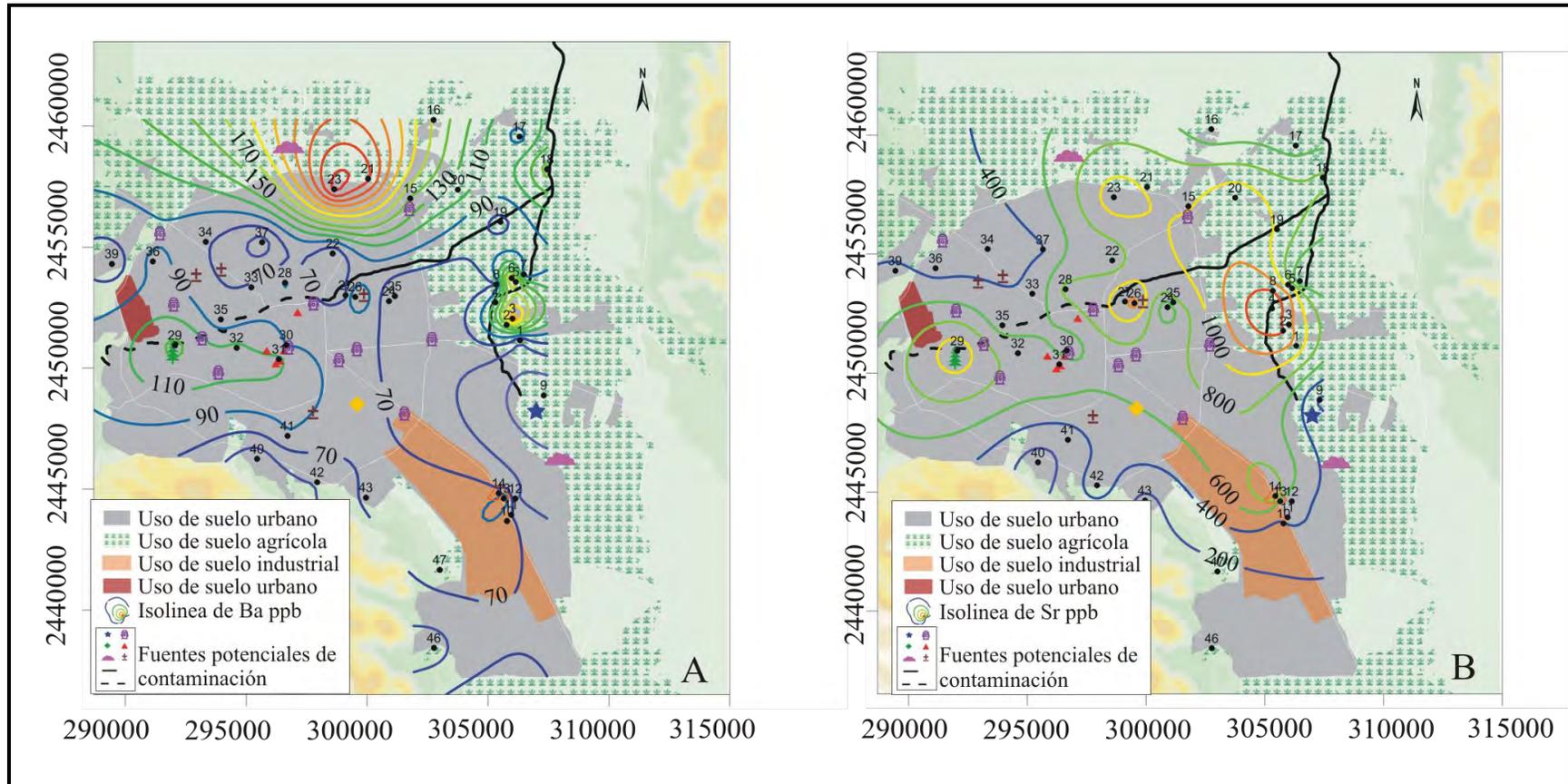


Figura I.6. Distribución espacial de a) Ba (ppm) y b) Sr (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.

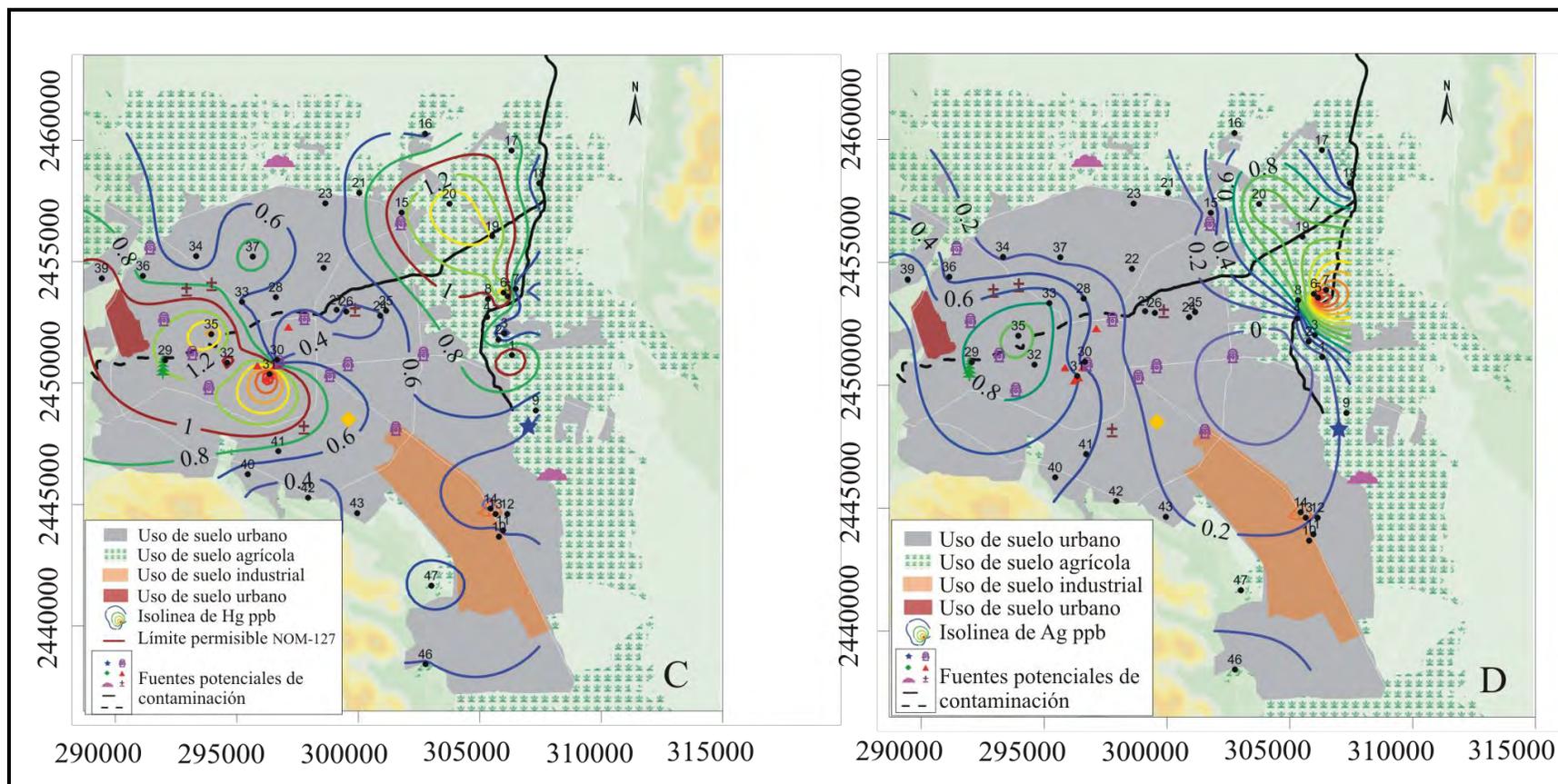


Figura I.6. Distribución espacial de c) Hg (ppm), d) Ag (ppm) basados en Moran-Ramírez, 2010.

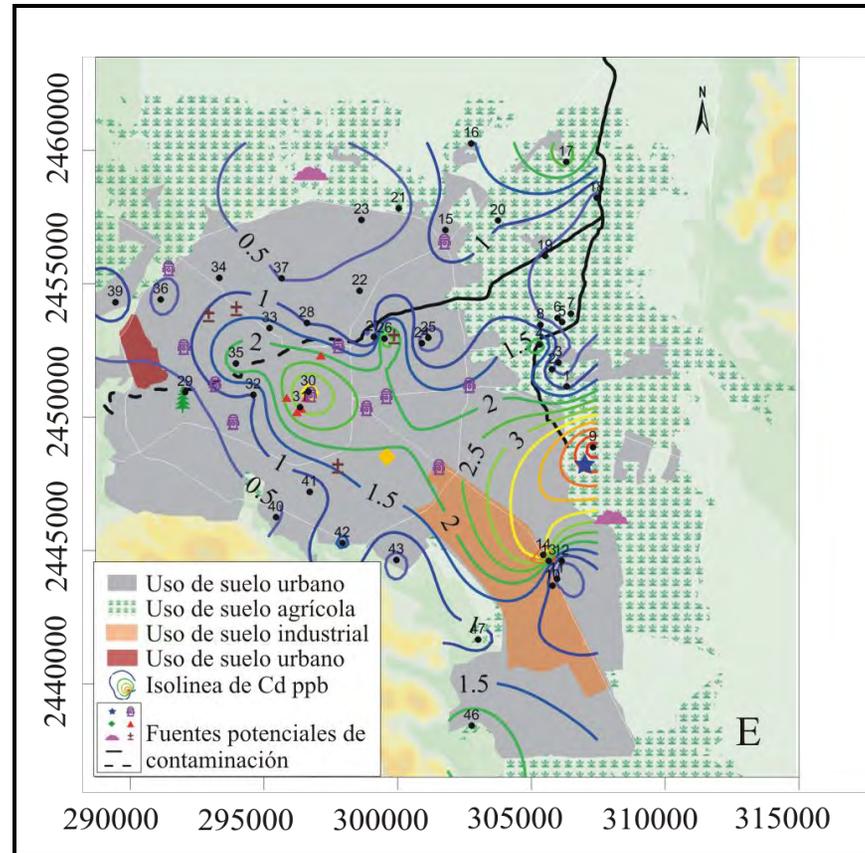


Figura I.6. Distribución espacial de e) Cd (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010.

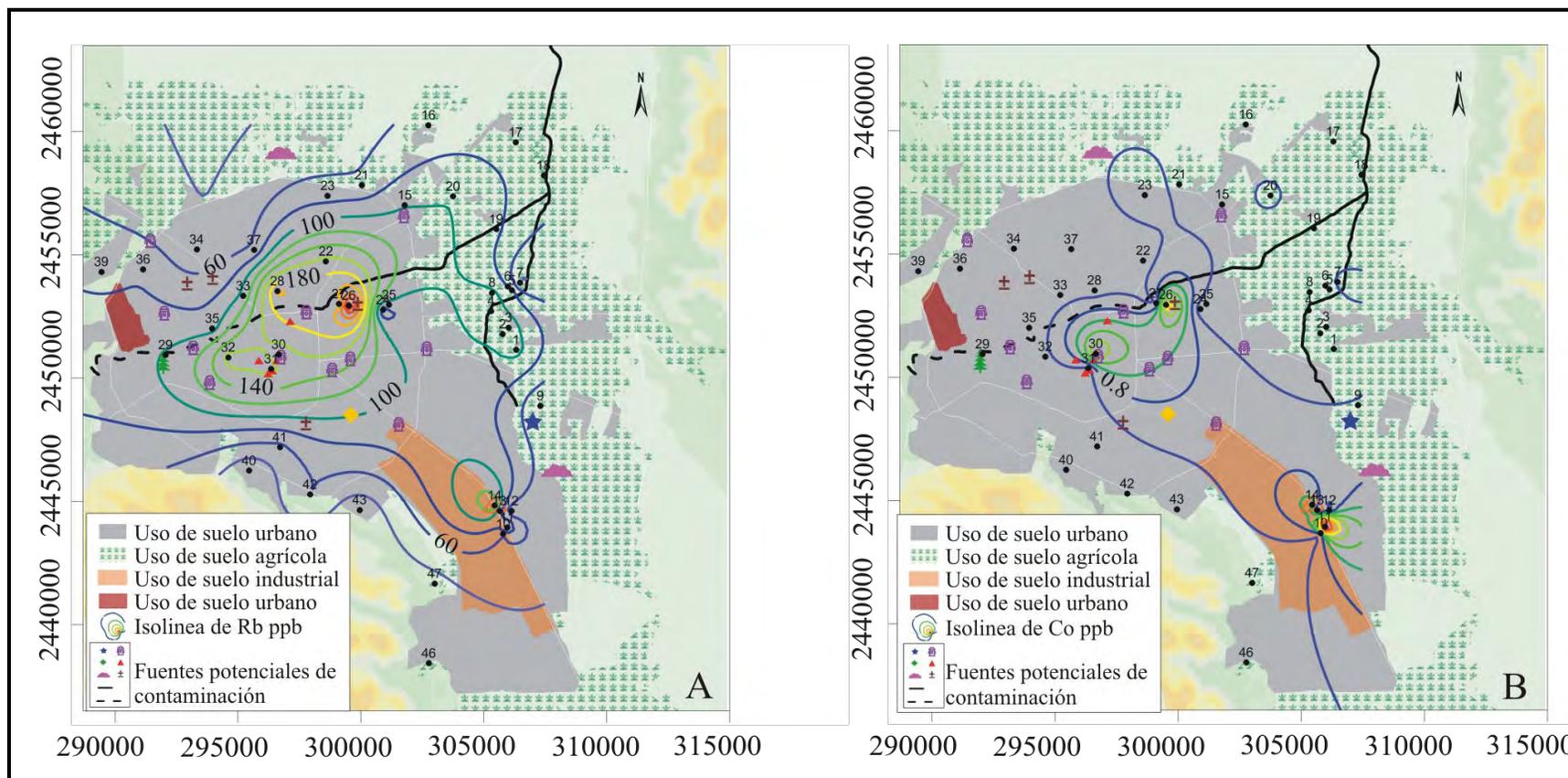


Figura I.7. Distribución espacial de a) Rb (ppm), b) Co (ppm), basados en Moran-Ramírez, 2010

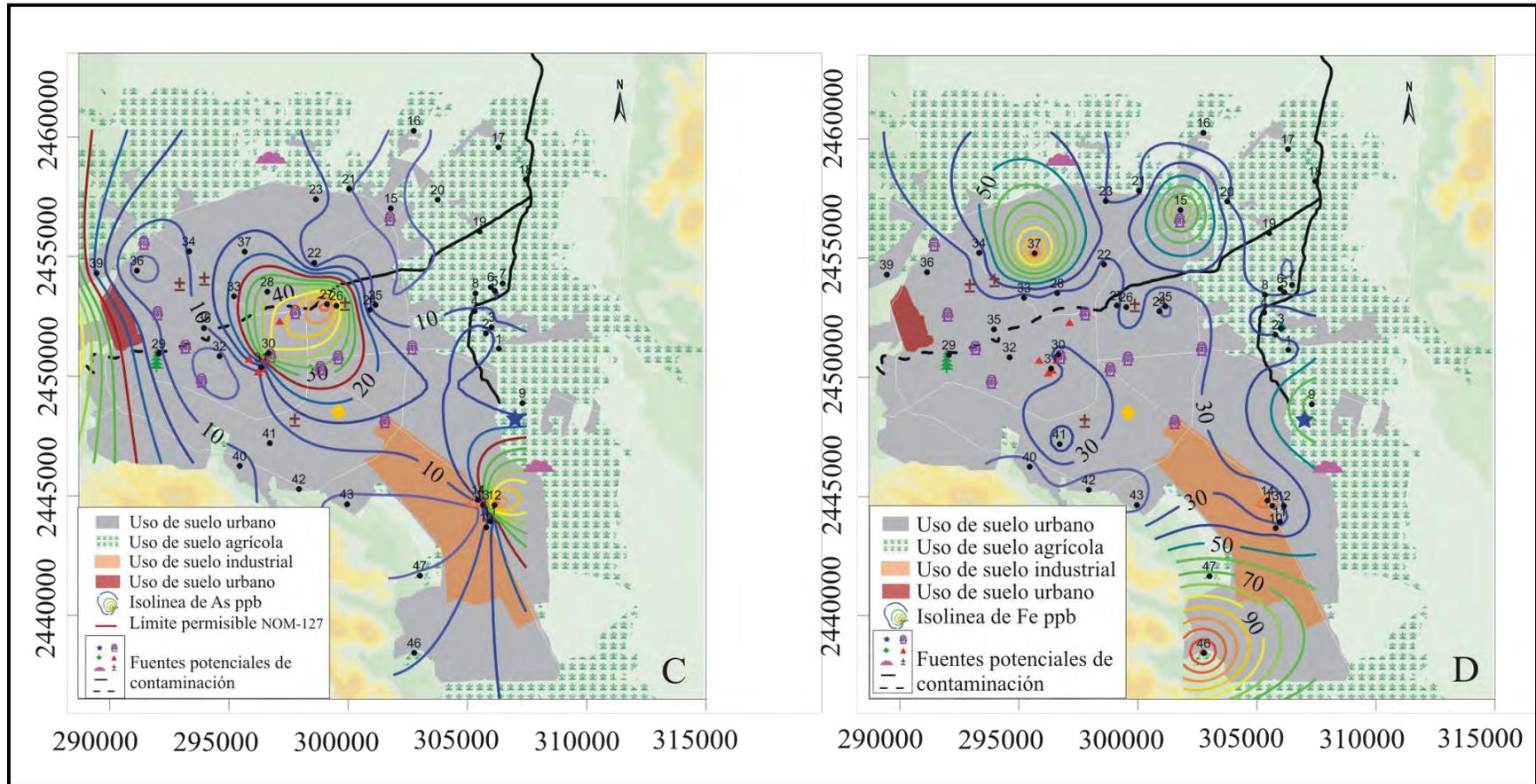


Figura I.7. Distribución espacial de ) As (ppb) y d) Fe (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010

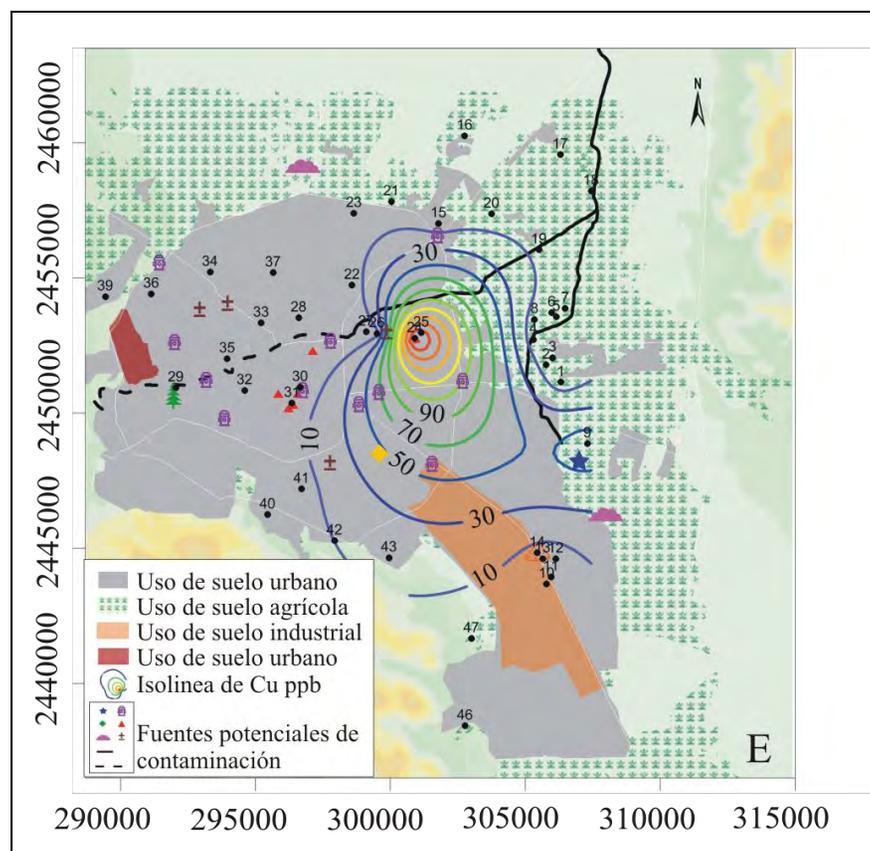


Figura I.7. Distribución espacial de e) Cu (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010

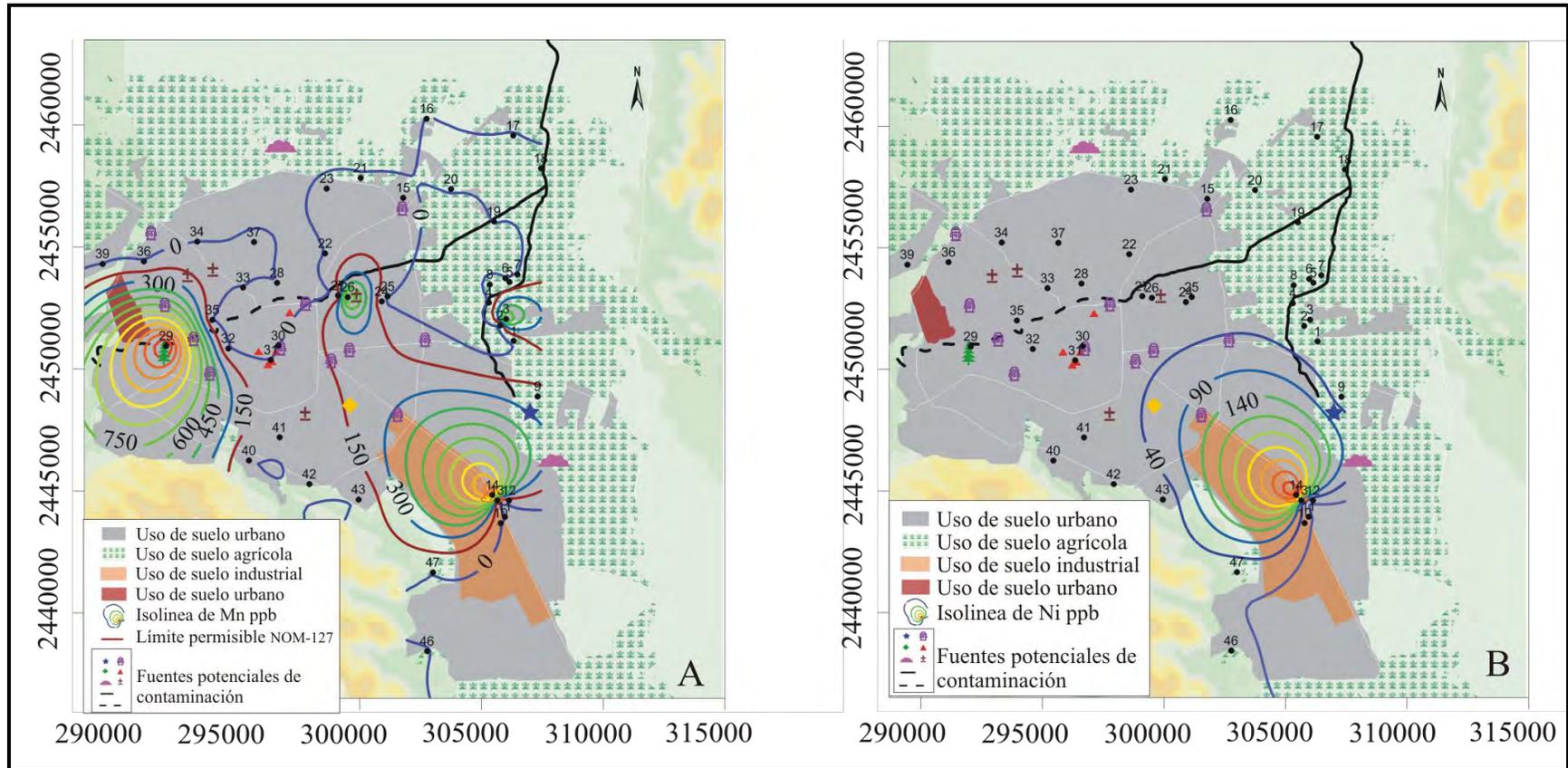


Figura I.8. Distribución espacial de a) Mn (ppb), b) Ni (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.

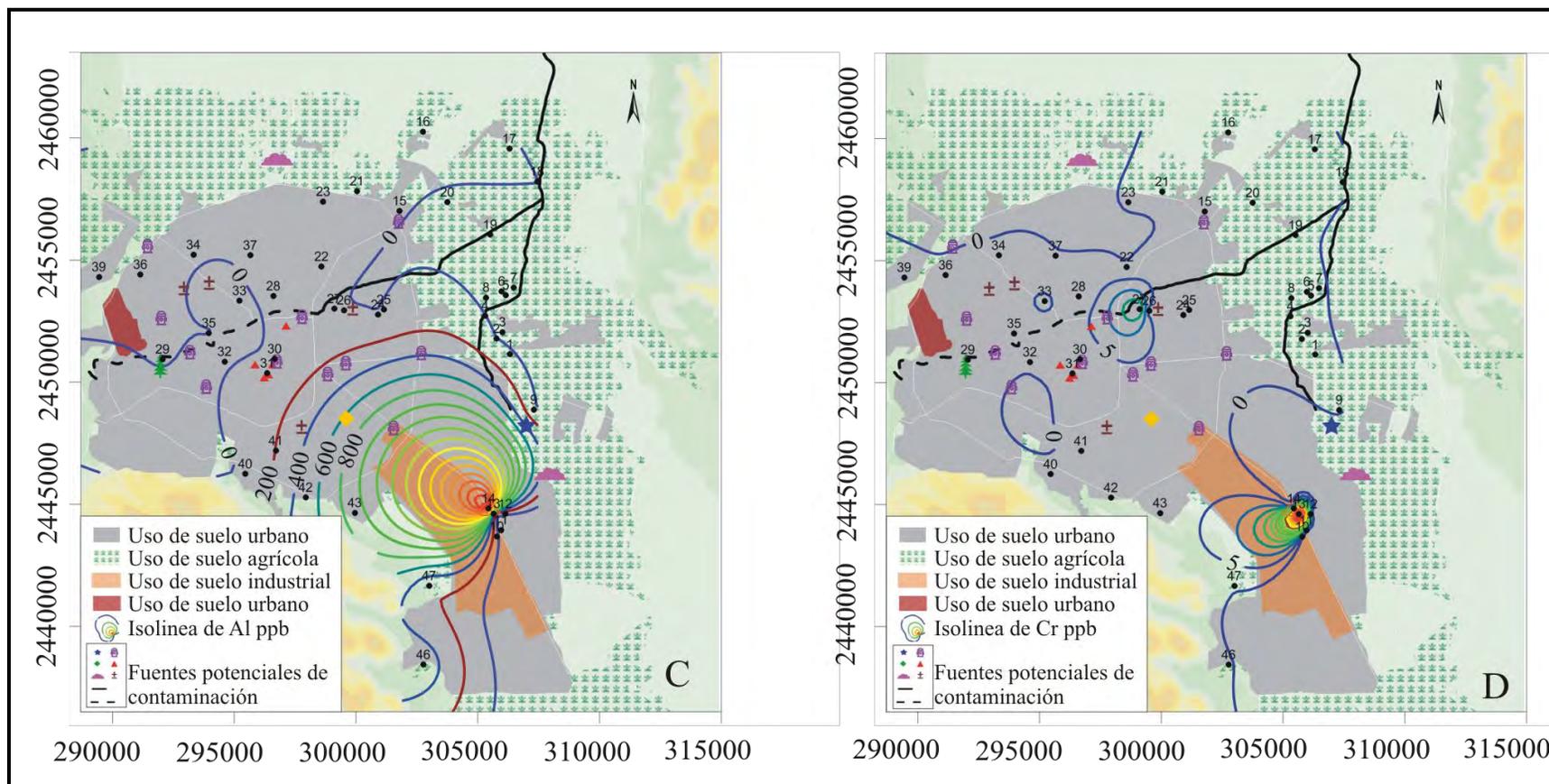


Figura I.8. Distribución espacial de c) Al (ppb), d) Cr (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.

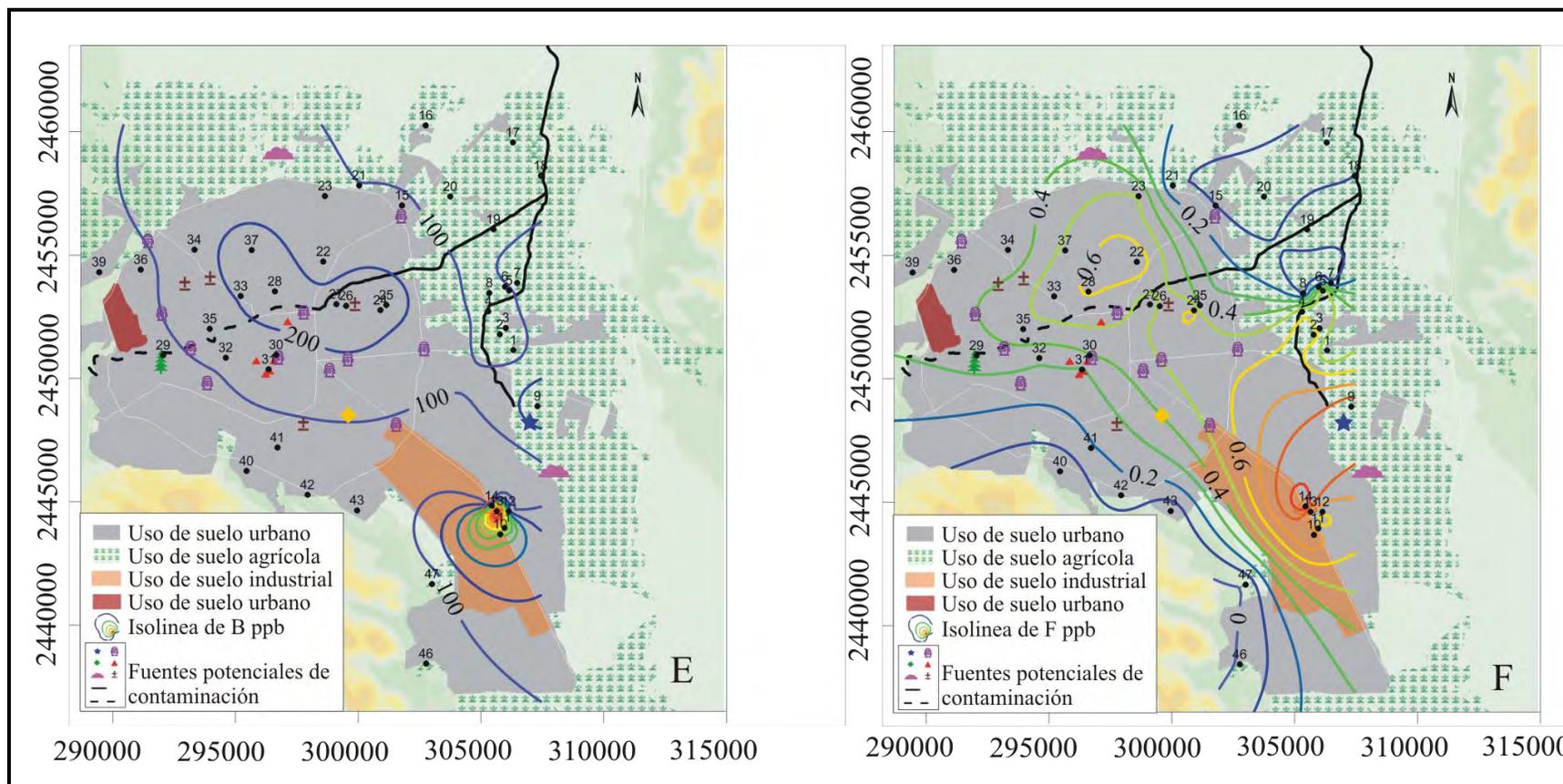


Figura I.8. Distribución espacial de e) B (ppb) y f) F (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.

### ***1.3.3.6. Contaminación en zonas agrícolas***

Las fuentes potenciales de contaminación presentes en la zona agrícola de SGS son panteones, canales con aguas residuales, disposición de residuos sólidos (Figura 1.3; Tabla 1.3). Debido a que el retorno de riego un factor importante en la movilidad de los contaminantes en este uso de suelo. Su contaminación característica es de tipo difusa, en los  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$  y materia orgánica. Derivado de estas fuentes potenciales de contaminación se detectaron niveles importantes de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Cl y CE (Figura 1.5a,b,c,d). En donde los valores más altos se presentan en las proximidades de los canales abiertos.

Este tipo de contaminantes son derivados del uso de aguas residuales, fertilizantes y agroquímicos en la actividad agrícola.

Algunos metales como Ba, Sr, Hg, Ag, Cd, Pb, Zn y Li se presentan de manera puntual en sitios cercanos a canales abiertos derivados del antiguo Tanque Tenorio (Figuras 1.6a,b,c,d,e y 1.9a,b,c), cuyas aguas provienen de la zona industrial (COTAS, 2005).

### ***1.3.3.7 Contaminación en zonas industriales***

Las fuentes potenciales de contaminación que existen en la zona industrial de San Luis Potosí están asociadas a disposición de lodos industriales, confinamiento de residuos industriales, terrenos industriales activos, terrenos industriales inactivos, gasolineras (Tabla 1.4). Derivado de estas fuentes potenciales de contaminación en la zona industrial se detectaron niveles importantes de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Cl, CE, CT y GA (Figura 1.5a,b,c,d,f).

Con una distribución puntual en las figuras 1.7, 1.8 y 1.19, se detectó Ba, Sr, Hg, Ag, Cd, Cr, Co, Ni, Al y Fe. Es importante mencionar que el sitio ocupado por una bodega con uso industrial activo resulto anómalo en todos los parámetros analizados (Figuras 1.5 a,b,c,d,f a 1.9 a,b,c).

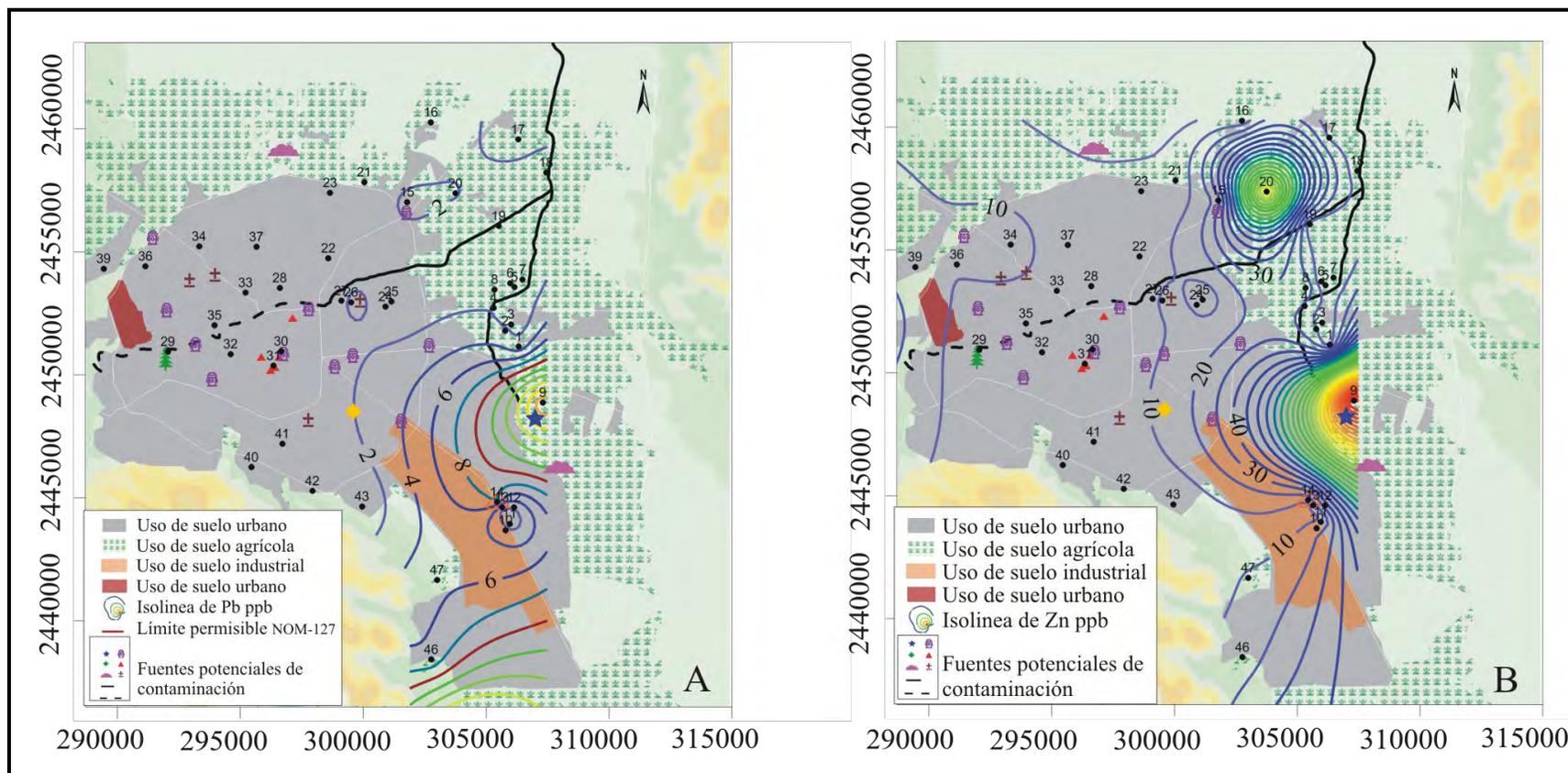


Figura I.9. Distribución espacial de a) Pb (ppb), b) Zn (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.

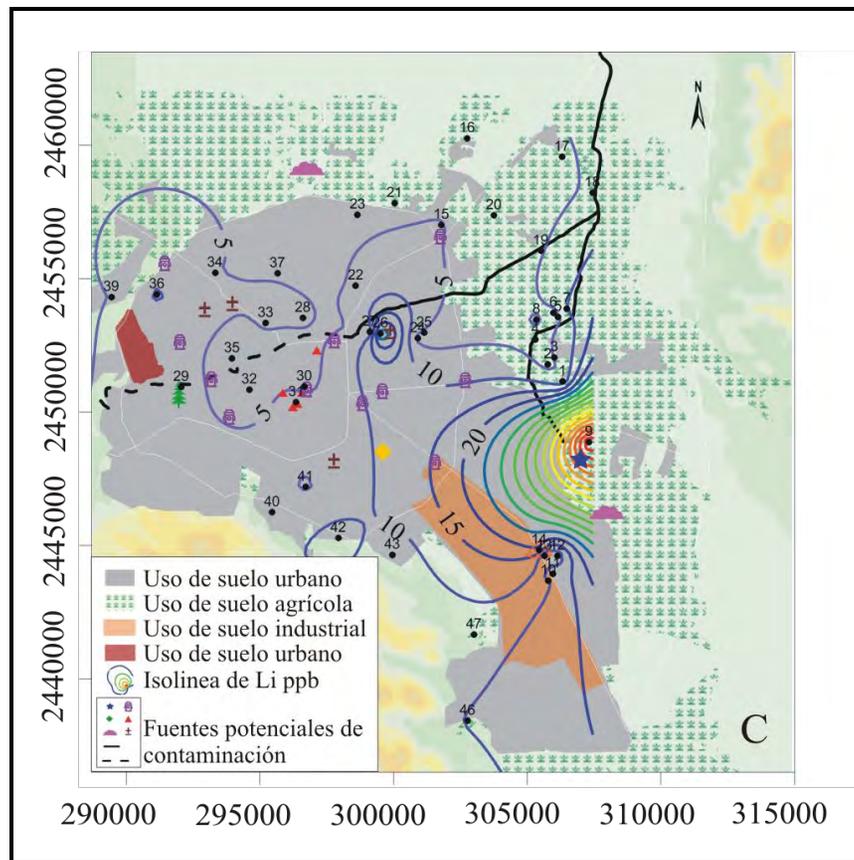


Figura I.9. Distribución espacial de c) Li (ppb), basados en Moran-Ramírez, 2010.

#### **I.4. Conclusiones**

La alteración al sistema hidrogeológico original desde el inicio de las actividades antropogénicas en el VSLP ha constituido un factor de alto impacto en la actual calidad del agua subterránea.

Los cambios hidrológicos al sistema natural en la región se habían dando de forma paulatina durante cuatro siglos a partir de la fundación de la ciudad; sin embargo, estos cambios han sido de forma drástica y en muy poco tiempo desde la segunda mitad del siglo veinte.

Así mismo, los cambios de uso de suelo en el valle desde los primeros asentamientos humanos hasta hoy en día, han propiciado un efecto de contaminación cruzada que vuelve más complejo el problema de contaminación en el agua subterránea.

Las fuentes potenciales de contaminación que existen en la zona industrial de San Luis Potosí están asociadas a disposición de lodos industriales, confinamiento de residuos industriales, terrenos industriales activos, terrenos industriales inactivos, gasolineras.

Las fugas de drenaje en la zona urbana alcanzan el nivel freático del acuífero colgado incrementando los valores de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Cl, CE, CT y GA.

El origen de metales pesados (Hg, Ag, Ba y Sr) en el centro de la ciudad de San Luis Potosí, se debe a las actividades mineras en los patios de beneficio realizadas poco después de la fundación de la ciudad, que además se llevaron a cabo sin ningún tratamiento de manejo de los residuos.

El uso de agua residual y agroquímicos en las actividades agrícolas en la zona de Soledad de Graciano Sánchez impacta de manera importante al acuífero como lo demuestran los niveles de  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Cl, CE y CT.

La presencia de metales (Ba, Sr, Hg, Ag, Cd, Pb, Zn y Li) en la zona agrícola se asocia a sitios cercanos a canales abiertos derivados del antiguo Tanque Tenorio.

La industria activa, actualmente inmersa en la zona urbana, también contribuye con importantes valores de metales (Hg, Ag, Ba, Sr y Mn) al acuífero colgado, como lo demuestra su presencia en la zona oriente de la ciudad.

En la zona industrial se detectaron grandes anomalías en casi todos los metales pesados; las anomalías son de tipo puntual y corresponden a un terreno industrial activo.

Como se estableció, la contaminación en el acuífero colgado del VSLP es compleja, debido al origen de las diferentes fuentes, por lo que su solución resulta también compleja. Los datos presentados en este trabajo son un diagnóstico de la

calidad del agua del acuífero colgado; sin embargo, se propone iniciar un monitoreo que permita establecer la hidrodinámica de los contaminantes antes tomar cualquier acción para mitigar sus efectos.

Algunas propuestas de acciones para aminorar los efectos de contaminación al acuífero son la instalación de plantas de tratamiento para los diferentes usos de agua, la modernización de la red de drenaje de la zona urbana, la instalación de rellenos sanitarios adecuados y la depuración primaria del agua residual utilizada para agricultura. Cabe mencionar que los resultados esperados de estas acciones no serían inmediatos, sino a largo plazo, por lo que es necesario iniciarlas en el menor tiempo posible.

## I.5. Bibliografía

- Aragón-Piña, A., Torres-Villaseñor, G., Fernández-Monroy, M., Luszczewski Kudra, A. y Leyva-Ramos, R., 2000. Scanning electron microscope and statistical analysis of suspended heavy metal particles in San Luis Potosi, Mexico: *Atmospheric Environment*, 34,4103-4112.
- Aragón-Piña A., Campos-Ramos, A., Leyva-Ramos, R., Hernández-Orta, M., Miranda-Ortiz, N. y antoni Luszczewski-Kudra, A., 2006. Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de San Luis Potosí, México: *Rev. Internacional de Contaminación Ambiental*, 22, 5-19.
- Bateman, A., 1974. Yacimientos minerales de rendimiento económico: Ediciones Omega, tercera edición, 975 p.
- Armienta-Hernández, M. A., Rodríguez-Castillo, R., Ceniceros N., Juárez F. y Cruz O. 1996. Distribution, Origin and Fate Soils in Guanajuato Mexico. *Environmental Pollution*, 9, 391-397.
- Barber, C., Otto, C. J., y Bate, L. E., 1996. Evaluation of the relationship between land-use changes and groundwater quality in a water supply catchment, using GIS Technology: The GWELUP Wellfield, Western Australia. *Hydrogeology Journal*, 4, 6–19.
- Carrillo–Rivera, J.J., Cardona-Benavides, A., Huizar–Álvarez, R. y Graniel-Castro, E., 2008. Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico. *Environmental Geology*, 55, 303-319.
- Cardona-Benavides, A., 2007. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 252 p.
- Cardona-Benavides, A., 1990. Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo: México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 97 p.
- Carrillo-Rivera J.J., Armienta, M.A., 1990. Diferenciación de la contaminación inorgánica en las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México: *Geofísica Internacional*, 28(4), 763-783.
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona-Benavides, A. y Edmunds, W. M., 2002. Use of abstraction regime and knowledge to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. *Journal of Hydrology*, 261, 24-47.
- Carrillo-Rivera, J. J., Cardona-Benavides, A., Moss, D., 1996, Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México: *Journal of Hydrology*, 185, 23-44
- Carrillo-Rivera, J. J., Clark, I.D. y Fritz P., 1992, Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes: *Applied Hydrogeology*, 1, 35-48.
- Charbonneau R. y Kondolf G. M., 1993. Land use change in California, USA: nonpoint source water quality impacts. *Environmental Management*, 17, 453-460.

- Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS), 2005. Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 “San Luis Potosí” en el Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, reporte, 74 p.
- Cox, M. E., Hillier, J., Foster, L., y Ellis, R., 1996. Effects of a rapidly urbanizing environment on groundwater, Brisbane, Queensland, Australia. *Hydrogeology Journal*, 4, 30–47.
- De la Rosa-Charcas, A. y Llanas-Rivera, M. A., 2000. Los grandes retos del Valle de San Luis. Secretaria de estudios y programas del comité ejecutivo estatal del Partido Revolucionario Demócrata
- Dummer M. y Straaten V., 1988. The influence of industrialization and hydrogeology on the quality of ground water and surface water in Bielefeld (case studies). Symposium on hydrological processes and water management in urban areas, 1988. Duisberg, FRG, 423–428.
- Fetter, C. W., 1996. *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall 4th edition, 589 p.
- Galván-Arellano, A., 1999. Arquitectura y urbanismo de la ciudad de San Luis Potosí en el siglo XVII. Facultad de Habitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, 268 p.
- Gutiérrez-Ruíz, M., Mario Villalobos, Romero, F. y Fernández-Lomelín, P., 2005. Natural attenuation of arsenic in semiarid soils contaminated by oxidized Arsenic wastes, en O’Day, P. A., Vlassopoulos, D., Meng, X. y Liane G. Benning, L. G., (eds.), *Advances in Arsenic Research: Integration of Experimental and Observational Studies and Implications for Mitigation: American Chemical Society ACS Symposium Series*, 915, 235-251
- Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN), 2009-2012, Plan Parcial de Conservación del Centro Histórico de San Luis Potosí: San Luis potosí, Proyectos Municipales, 221 p.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 2010, Censo de Población y Vivienda 2010: México, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. (IPICYT), 2010. Diagnóstico del potencial del acuífero somero del Valle de San Luis Potosí como una fuente alternativa de abastecimiento. Reporte técnico elaborado para el Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS), 95 p.
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A. C. (IPICYT), 2007. Estudio hidrogeológico de la porción oriental del Valle de San Luis Potosí. Reporte técnico elaborado para el Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 174 p.
- Irrig J. y Engrg D., 1987. Effect of Irrigation on Groundwater Quality in California. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 113.
- Keiser-Shlittler, A., 1992. Breve Historia de la ciudad de San Luis Potosí: Keiser Editores, 230 p.
- Liu, W., Zhau, J., Ouyang, Z., Soderlund, L., y Liu, G., 2005b. Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China. *Environmental International*, 31, 805–812.
- Medellín-Milan, P., 2003. Tanque Tenorio, diez años después. Pulso, Diario de San Luis, Sección Ideas. Publicado el 22 de Mayo de 2003, p 4.

- Moran-Ramírez, J., 2010. Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura, Área de Ciencias de Químico Biológicas, Universidad del Noreste, 68 p.
- Noyola-Medrano, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez L. F., López-Loera, H. y Carbajal N., 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24,395-410.
- Pradeep K. Naik, Jivesh A. Tambe, Biranchi N. Dehury y Arun N. Tiwari, 2008. Impact of urbanization on the groundwater regime in a fast growing city in central India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, 339-373.
- Peña, F., 2006, Abasto de agua a la ciudad de San Luis Potosí, en Barkin, D. (ed.), *La Gestión del Agua Urbana en México: México*, Universidad de Guadalajara, 249-264.
- Robert Charbonneau y G. M. Kondolf, 1993. Land use change in California, USA: Nonpoint source water quality impacts. *Environmental Management*, 17, 453-460.
- Ramos-Leal, J.A., López-Loera, H., Martínez-Ruiz, V.J., Aranda-Gómez, J.J., 2007. Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, Mexico) inferida a partir de datos geoelectrónicos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 31-46.
- Ramos-Leal, J.A., 2002. Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 106 p.
- Robles Camacho, J. y Armienta Hernández, M. A. 2000. Natural Chromium Contamination of Groundwater at Leon Valley, Mexico. *Journal of Geochemical Exploration*. 68, 167-181.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008, Boletín del Archivo Histórico del Agua. Año 13, No. 40, Septiembre- diciembre 2008, 89 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2005. Informe sobre la situación del medio ambiente en México 2005, disponible en [http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe\\_04/07\\_agua/recuadros/c\\_rec2\\_07.htm](http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/07_agua/recuadros/c_rec2_07.htm), consultado el 2 de Mayo de 2011.
- Sheridan-Prieto, C., 2001, Indios madrineros colonizadores tlaxcaltecas en el noroeste novohispano: *Estudios de Historia Novohispana*, 24 p.
- Susanna T. Y. Tongf1 y Wenli Chen, 2002. Modeling the relationship between land use and surface water quality. *Journal of Environmental Management*, 66, 377-393.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2004. Groundwater contamination Inventory: a methodological guide. Project 3.1 (IHP-V), 162 p.

# **II**

## **CALCULO DEL INDICE DE POBREZA DEL AGUA EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSI**

## II.1. Introducción

En el capítulo anterior se estableció como las actividades humanas modificaron el sistema natural que existía en el Gran Tunal, no sólo en el entorno superficial sino también en el subterráneo y las consecuencias de las modificaciones. En éste capítulo, se presenta un análisis del vínculo que existe entre el sistema acuífero y las condiciones socioeconómicas de la población del VSLP, así como la forma en que hacen uso del recurso hídrico, mediante el cálculo del Índice de Pobreza del Agua (IPA)

El IPA fue desarrollado por un equipo de investigadores, profesionales y actores sociales del agua en el mundo, bajo la dirección del Centro de Ecología e Hidrología (CEH) en Wallingford, Reino Unido, como parte del Consejo de Investigación del Medio Ambiente del gobierno británico. El IPA es una nueva herramienta holística, diseñada para contribuir a un efectivo manejo del agua (Sullivan *et al.*, 2003). Este índice permite evaluar la pobreza de agua en los países, regiones o comunidades, tomando en cuenta tanto factores físicos como socioeconómicos relacionados con la disponibilidad de agua (Lawrence *et al.*, 2002). La metodología desarrollada fue aplicada a 140 países considerando aspectos como los recursos hídricos, el acceso, la capacidad, el uso y el medio ambiente, en una escala de evaluación de 0 a 100.

El propósito del IPA consiste en expresar una medida interdisciplinaria que vincula el bienestar de los hogares con la disponibilidad de agua e indica el grado de los efectos de la escasez de agua en las poblaciones humanas. Los componentes permiten establecer nexos entre pobreza, marginación social, integridad ambiental, disponibilidad del agua, y salud. Esto permite dirigir políticas públicas a grupos interés e identificar dónde existen problemas y proponer medidas apropiadas para encarar sus causas. El IPA demuestra que no es la cantidad de recursos disponibles la que determinan los niveles de pobreza en un país, sino la eficacia en el uso de esos recursos (Sullivan, 2001, 2002; Sullivan *et al.* 2002, 2003).

En el trabajo de Lawrence *et al.* (2002), se muestra en orden descendente que los 10 países más ricos en función de recursos hídricos del mundo fueron: Finlandia, Canadá, Islandia, Noruega, Guyana, Surinam, Austria, Irlanda, Suecia y Suiza; y que los 10 países con mayor carencia hídrica en orden ascendente fueron: Haití, Níger, Etiopía, Eritrea, Malawi, Djibouti, Chad, Benin, Ruanda, y Burundi. La diferencia entre el país con mayor puntuación (Finlandia, 78), y el de menor puntuación (Haití, 35), fue de 43 puntos.

En este mismo reporte México obtuvo una puntuación de 57. Este valor podría explicarse toda vez que el 51% del territorio mexicano pertenece a zonas áridas, cuyo régimen de aridez va de los 7 a 12 meses de sequía; es decir, es altamente vulnerable desde el punto de vista hídrico (Verbist *et al.*, 2010). El clima en la parte norte del país es árido a semi-árido, y en ella se encuentran las ciudades más grandes y que concentran las principales actividades industrial y agrícola, en las

que además el agua subterránea juega un papel esencial en la economía (Marín, 2002), lo que ha provocado la sobreexplotación de los acuíferos, que en algunos casos alcanzan el estado de minado (Noyola *et al.*, 2009).

## II.2. Desarrollo del IPA para el Valle de San Luis Potosí

El enfoque del índice compuesto se basa en la estructura y metodologías usadas para el Índice de Desarrollo Humano propuesta por la UNESCO en el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2002), está basada en la premisa de que una combinación de variables relevantes puede proporcionar una perspectiva más completa, en una situación particular, que lo que puede una sola. Las variables forman un componente que es colectado y sumado, para generar un valor global del IPA. Cada sub-componente se escala como un índice en sí, basado en el rango de valores en cada variable en ese lugar (Sullivan, 2002).

La metodología propuesta por Lawrence *et al.* (2002), considera cinco componentes clave; sin embargo, en la aplicación del IPA para el VSLP, considerando información del año 2005, se tomó en cuenta la calidad del agua, debido a que en México el agua subterránea presenta graves niveles de contaminación tanto de origen natural como antropogénica (CONAGUA, 2011).

La estructura matemática en la que se basa el IPA, se expresa como sigue:

$$IPA_i = \frac{\sum_{i=1}^N w_{Xi} X_i}{\sum_{i=1}^N w_{Xi}} \quad (\text{Ec. II.1})$$

donde  $IPA_i$ , es el Índice de Pobreza del Agua para una región en particular, resulta de la suma ponderada de seis componentes: Recursos (R); Acceso (A); Uso (U); Capacidad (C); Medio Ambiente (E) y Calidad del Agua (Q), cada uno con un valor comprendido entre 0 y 1. De manera que la estructura del IPA para el VSLP quedó definida por seis componentes (Tabla II.1).

El peso  $w$  se aplica a cada componente ( $X_i$ ) de la estructura de IPA, para esa región;  $X_i$  se refiere al valor de cada componente.

La ecuación (Ec. II.1) también puede ser expresada en forma desarrollada (Ec. II.2). Para estandarizar los resultados y producir un valor de IPA de entre 0 y 1, la suma tiene que ser dividido por la suma de pesos como se muestra:

$$IPA_i = \frac{w_r R + w_a A + w_c C + w_u U + w_e E + w_q Q}{w_r + w_a + w_c + w_u + w_e + w_q} \quad (\text{Ec. II.2})$$

En la mayoría de los componentes fue aplicado un análisis de pesos para definir el que corresponde a cada subcomponente (Ramos, 2002). La expresión del análisis de pesos es:

$$W_{x_i} = \frac{X_{r_i} * X_{w_i}}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (\text{Ec. II.3})$$

donde  $X_{r_i}$  y  $X_{w_i}$  son las puntuaciones para cada componente  $X_i$  y sus pesos teóricos y  $W_i$  es la sumatoria de pesos teóricos.

Tabla II.1. Componentes clave en el IPA (Modificada de Lawrence *et al.*, 2002).

Componente del IPA	Definición	Datos usados
Recursos (R)	Disponibilidad física del agua superficial y subterránea, tomando en cuenta su uso y el balance hídrico.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agua superficial</li> <li>• Agua subterránea</li> <li>• Volumen aprovechados</li> </ul>
Acceso (A)	Nivel de acceso al agua segura para uso humano.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % De población con acceso a agua potable</li> <li>• % De población con acceso a drenaje.</li> <li>• % De tierras arables con acceso al riego.</li> </ul>
Capacidad (C)	Eficacia de la capacidad de la población en el manejo del agua.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ingresos.</li> <li>• Tasa de mortalidad de niños menores de 5 años.</li> <li>• Índice de educación.</li> <li>• Coeficiente de Gini.</li> </ul>
Uso (U)	Las formas en la cual es usada el agua para diferentes propósitos. Incluye los usos doméstico, agrícola e industrial.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso doméstico del agua en litros por día.</li> <li>• Porcentaje de agua usada para la agricultura e industria ajustada a su participación como sector del PIB.</li> </ul>
Ambiente (A)	Evaluación de la integridad ambiental relacionada al gua.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usos de suelo</li> <li>• Áreas Naturales Protegidas</li> </ul>
Calidad del agua (Q)	Evaluación de la calidad del agua para uso humano.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Datos de calidad del agua superficial y subterránea.</li> </ul>

## 2.1. Recurso

El sistema acuífero del VSLP abarca 1980 Km<sup>2</sup>, comprende parcial o totalmente los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y Zaragoza (SEMARNAT, 2008). Como ya se mencionó el sistema está definido por un acuífero somero formado por material de relleno y uno profundo constituido por roca volcánica fracturada. En el caso del agua subterránea, el acuífero somero aporta el 3% del agua empleada para diferentes usos; tiene una recarga de 4 Mm<sup>3</sup>/año y una extracción de 5 Mm<sup>3</sup>/año. Mientras que el acuífero profundo aporta el 97%; tiene una recarga casi nula y, en contraste, tiene una extracción de 148.5 Mm<sup>3</sup>/año (Noyola *et al.*, 2009).

En lo que respecta al agua superficial, la población del VSLP depende del volumen de agua almacenada en las presas El Peaje, El Potosino y San José que en su conjunto aportan 11.97 Mm<sup>3</sup>/año (COTAS-CONAGUA-SEMARNAT, 2005;DOF, 2010).

Este componente está relacionado con la disponibilidad física del agua que se tiene en el área de estudio y que es utilizada en diferentes actividades humanas. Considera dos subcomponentes, el agua superficial y el agua subterránea. El peso asignado a cada subcomponente está relacionado con el porcentaje de uso, como se ve en la siguiente expresión matemática:

$$R = 0.08A_{sup} + 0.92A_{sub} \quad (\text{Ec. II.4})$$

$$A_{sup} (Mm^3) = \frac{Vol.almacenado}{Vol.precipitaciónAnual} \quad (\text{Ec. II.4.1})$$

$$A_{sub}(Mm^3) = \frac{Re\ c\ arg\ a - Extracción}{2Extracción} \quad (\text{Ec. II.4.2})$$

El componente R fue evaluado considerando un sistema acuífero formado por los dos acuíferos descritos anteriormente y ponderados de acuerdo a su porcentaje de uso.

## 2.2. Acceso

El sistema acuífero del VSLP comprende, parcial o totalmente, los Municipios de San Luis Potosí (SLP), Soledad de Graciano Sánchez (SGS), Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y Zaragoza con una población total de 1,016,461 habitantes (INEGI, 2005a). La zona metropolitana la conforman los dos primeros municipios y concentra el 93% de la población del valle.

Los habitantes del VSLP tiene acceso a agua potable y a sistemas de saneamiento en un 86% y 77%, respectivamente (INEGI, 2005a). Mientras que el VSLP tiene 42,755 Ha de tierras cultivables de las cuales 11,853 Ha son regadas (INEGI, 2007)

Este componente toma en cuenta el porcentaje de la población que tiene acceso a agua segura ( $A_{ap}$ ) para sus necesidades básicas; porcentaje de agua que recibe saneamiento ( $A_s$ ) y finalmente la relación de tierras cultivables entre las tierras con acceso al riego ( $A_r$ ). La expresión que define a este componente es:

$$A = 0.6A_{ap} + 0.3A_s + 0.1A_r \quad (\text{Ec. II.5})$$

La asignación de pesos para los subcomponentes fue obtenida mediante un análisis de pesos (Ramos, 2002), que muestran que el subcomponente  $A_{ap}$  es el más importante, en tanto que el de menor peso es el  $A_r$ .

### 2.3. Capacidad

Este componente se basa en el Índice de Desarrollo Humano (IDH), evalúa las variables socio-económicas que pueden afectar el acceso al agua o ser un reflejo de acceso y calidad del agua. Introduce el coeficiente de Gini en un intento de ajustar la capacidad de disfrutar de acceso a agua limpia por una medida de la distribución desigual del ingreso (Lawrence *et al.*, 2002).

El IDH en México se ha calculado para el ámbito municipal realizando ajustes debido a las restricciones de disponibilidad de información, sin alterar su naturaleza. Uno de los ajustes realizados es lo que respecta a los ingresos (PNUD/Mexico, 2000-2005).

El Producto Interno Bruto per cápita (PIB) no está disponible a nivel municipal, por lo tanto, se utiliza el Ingreso Neto Total Per Cápita por hogar. Este ingreso considera ingresos corrientes monetarios y no monetarios (CONEVAL, 2007). Estos datos son obtenidos de la Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos de los Hogares del 2005.

Los subcomponentes son el Índice de ingresos ( $I_i$ ); tasa de mortalidad de niños menores de 5 años ( $M_i$ ); Índice de educación ( $I_e$ ) y Coeficiente de Gini ( $C_G$ )

La capacidad es evaluada a través de la expresión:

$$C = 0.3I_i + 0.05M_i + 0.5I_e + 0.15C_G \quad (\text{Ec. II.6})$$

La asignación de pesos para los subcomponentes fue obtenida mediante un análisis de pesos (Ramos, 2002), que muestran que el subcomponente  $I_e$ , es el más importante,  $I_i$ , es de mediana importancia y  $M_i$  es el menos importante.

### 2.4. Uso

En la primera mitad del siglo XIX, la población del VSLP se abastecía de agua por medio de norias y el uso del agua era principalmente doméstico y de irrigación de

pequeños huertos (Sheridan-Prieto, 2001 citado en Noyola *et al.*, 2009). Para 1960, 59% del agua para uso doméstico era superficial y 41% provenía del acuífero. Hoy en día, 92% del agua es proviene del acuífero y el 8% es agua superficial (SEMARNAT, 2008). De acuerdo con Peña (2006) el acuífero de San Luis Potosí se ha sido clasificado como un acuífero urbano, partiendo del hecho de que la mayor parte del acuífero se encuentra bajo la zona urbana, incrementando el riesgo de contaminación y de subsidencia. En éste trabajo se reportaba que el 67.2% era para uso doméstico, industrial 7.7% y 19.8% agrícola. En la actualidad la demanda de agua subterránea para consumo humano es de 78%, industrial 14% y para la agricultura 4.8%

En el VSLP la dotación de agua potable a la población va de los 199.8 a los 250 litros/habitante/día (INTERAPAS, 2010 y CNA, 2002).

Para determinar el agua para industrial se estableció la relación entre la proporción del PIB derivado de la industria y la cantidad de agua utilizada por ésta. Esto da una medida aproximada de la eficiencia del uso del agua (Lawrence *et al.*, 2002). Este mismo procedimiento se aplica para el agua para uso agrícola.

En la zona de estudio la industria y la agricultura aportan el 26 y 4.66% del PIB estatal, respectivamente (INEGI, 2005b).

Este componente considera tres subcomponentes: agua para uso doméstico ( $U_d$ ), agua para uso industrial ( $U_i$ ) y agua para uso agrícola ( $U_g$ ) y se determina en base a la siguiente ecuación:

$$U = 0.78U_d + 0.11U_i + 0.07U_a \quad (\text{Ec. II.7})$$

El peso asignado para los subcomponentes está basado en el porcentaje de uso del agua en el VSLP.

## 2.5. Medio ambiente

Hoy en día alrededor de un diez por ciento de la superficie terrestre del mundo cuenta con algún tipo de protección. Una área protegida es un espacio geográfico claramente definido, reconocido, dedicado y gestionado, mediante medios legales u otros tipos de medios eficaces para conseguir la conservación a largo plazo de la naturaleza y de sus servicios ecosistémicos y sus valores culturales asociados (Dudley, 2008). En México en 2007, existían 158 áreas protegidas, las que conforman el 11 % de la superficie de la república mexicana. Actualmente La Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas administra 174 áreas naturales de carácter federal que representan más de 25,334,353 hectáreas, es decir 12.9% del territorio nacional (CONANP, 2012). Sin embargo, se ha estimado que el 90 por ciento de la superficie del bosque tropical de la República Mexicana ha desaparecido y que el 99.4 por ciento del bosque antiguo de pino-encino de la

Sierra Madre Occidental ha desaparecido y se encuentra alterado como hábitat de plantas y animales.

El VSLP ha tenido alteraciones en el medio ambiente desde la fundación de la ciudad en 1592, de tal manera que la zona boscosa en la SSM fue deforestada a consecuencia de las actividades económicas a partir del siglo XVI. Actualmente la SSM tiene una Área Natural Protegida (ANP) con una superficie de 44,170 hectáreas, repartidas en 13 ejidos, en los Municipios de San Luis Potosí, Mexquitic de Carmona, Villa de Reyes y Villa de Arriaga en el Estado de San Luis Potosí (DOF, 2009).

A pesar de contar con una ANP, la cuenca a la cual pertenece el VSLP, se ha modificado en un 60 por ciento la vegetación natural en la zona montañosa desde que se fundó la ciudad y ha sido reemplazada por usos de suelo antropogénico (Figura II.1), lo cual ha representado una importante alteración en el sistema hidrogeológico dentro de la cuenca, por ejemplo baja infiltración, erosión y en los últimos años inundaciones en las partes bajas de la ciudad. Por ejemplo de 1983 a 2005 se perdió un 45% del bosque de pino encino localizado mayormente en la SSM, mientras que para el mismo periodo se perdió un 61 por ciento del área de pastizal natural (INEGI, 1983).

### **2.6. Calidad**

Los seres humanos se han apropiado del agua para abastecer casas, producir alimentos y utilizarla en la industria; estos usos han impactado la cantidad y calidad del agua; esta degradación tiene implicaciones en la salud, en la sociedad, en la cultura, en la política y en la economía.

El aprovechamiento inadecuado de los recursos hídricos, tanto en los países desarrollados como en las naciones en vías de desarrollo, es una de las principales razones para su deterioro. En 1998, la Comisión Mundial del Agua para el Siglo XXI, informó que más de la mitad de los grandes ríos del mundo estaban contaminados o en peligro de desecarse. Esto provocó que durante ese año tuvieran que emigrar 25 millones de personas (OMM-UNESCO, 1998). También indica que en una evaluación de la cantidad y calidad del agua disponible es un prerequisite para el desarrollo y administración del recurso hídrico, ya sea para el propósito de suministrar agua a la población, la agricultura, la industria o la producción de energía.

Un agravante de la disponibilidad de agua en México es la contaminación del recurso. Esto provoca que la disponibilidad de agua en gran parte del país sea insuficiente para satisfacer la demanda (Palacios, 2000). Una de las posibles causas, se debe al incremento del uso del agua destinada a la industrial y a su falta de saneamiento; así como, al manejo inadecuado del riego agrícola, el cual ocupa entre el 78% y el 82% del agua disponible y produce entre un 7% y un 5% del PIB (Oswald, 2003).

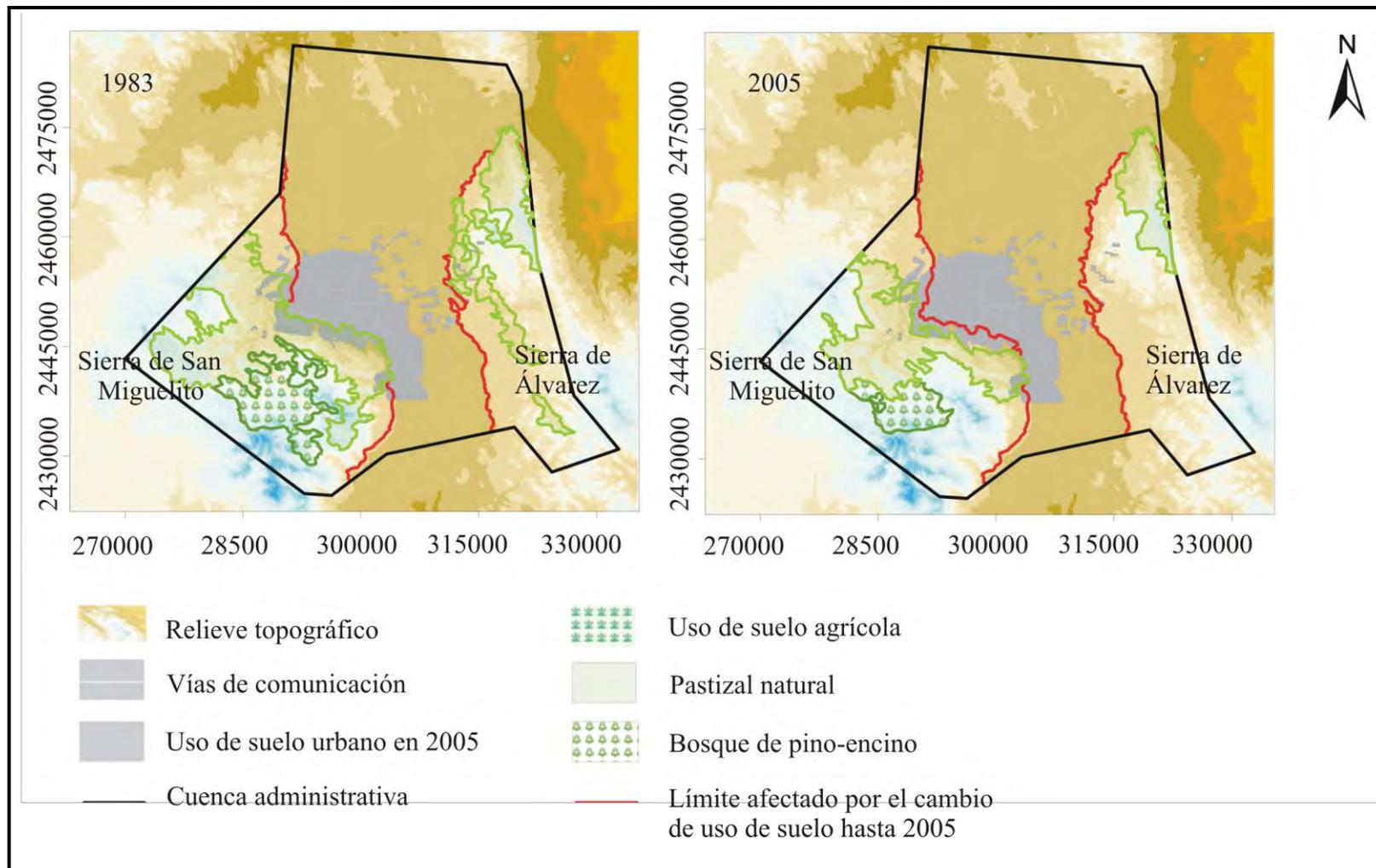


Figura II.1. Cambios de uso de suelo durante el periodo de 1983 a 2005.

En el IPA el componente que hace referencia a la calidad del agua fue evaluado mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA) desarrollado por Brown *et al.*, (1973). Éste índice es una evaluación numérica de las concentraciones de los parámetros químicos analizados, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de peso específico obteniéndose a partir de una media geométrica (Ec. 35).

$$ICA = k \frac{\sum C_i P_i}{\sum P_i} \quad (\text{Ec. II.8})$$

donde  $C_i$ , valor porcentual asignado a los parámetros debido a su concentración;  $P_i$ , peso asignado a cada parámetro;  $k$ , constante que toma el valor de 1, para aguas claras sin aparente contaminación; 0.75, aguas claras con ligero color, espuma, ligera turbidez aparente no natural; 0.50, aguas con apariencia de estar contaminada; 0.25, aguas negras que presentan fermentaciones y olores.

En este trabajo se desarrollo la siguiente expresión para obtener el componente de calidad del agua basado en el ICA para el agua superficial y el agua subterránea (Ec. II.10).

$$Q = 0.08Q_{Asup} + 0.92(0.03Q_{AsubS} + 0.97Q_{AsubP}) \quad (\text{Ec. II.9})$$

donde  $Q_{Asup}$ ,  $Q_{AsubS}$  y  $Q_{AsubP}$  es el ICA para el agua superficial, agua subterránea del acuífero somero y agua subterránea del acuífero profundo, respectivamente. Los factores de peso (0.08, 0.92, 0.03 y 0.97) utilizados en este componente fueron asignados de acuerdo al porcentaje de uso de estas fuentes en el VSLP.

En una escala de 0 a 100, donde 100 representa una excelente calidad y valores menores a 50 representa problemas graves de contaminación.

La puntuación del ICA para las aguas superficiales es de 70 y para el acuífero somero de 45 (Morán, 2010) y para el acuífero profundo de 75 (Ramos, 2007). Estos valores fueron utilizados en la ecuación (9), con lo cual se obtuvo la puntuación de 73.8 para el componente Q.

## II.3. Resultados y discusión

### 3.1. Componentes del IPA

#### 3.1.1. Recurso

El agua superficial no es abundante, debido a la baja precipitación anual de 350 mm y a una evapotranspiración anual de aproximadamente 2000 mm (Ramos, 2007). Únicamente origina corrientes superficiales intermitentes que son captados en tres presas activas.

Por otro lado la principalmente fuente de abastecimiento para la población la constituye el acuífero profundo, tiene problemas de recarga y el agua que se extrae actualmente tiene edades de hasta 6300 años (Noyola *et al.*, 2009; Cardona *et al.*, 2006).

Para evaluar el parámetro R, el valor de 100 representa una abundancia del recurso hídrico. Un valor de 50 representa en el caso de los acuíferos un recurso en equilibrio, en tanto que valores menores a 50 representa un agotamiento del acuífero. En el caso del VSP, se obtuvo un valor de 25.8 para este componente, lo cual es congruente con la condición actual de minado del acuífero profundo reportada por Noyola *et al.* (2009).

### 3.1.2. Calidad

La calidad del agua es tan importante como la cantidad que se tenga de ésta. En México la variabilidad fisiográfica y climática limita la disponibilidad del agua (cantidad y calidad). Actualmente solo el 66% del agua superficial, es excelente o aceptable, el resto requiere tratamiento o se encuentra severamente contaminada. De la calidad del agua subterránea poco se sabe, a pesar de que constituye la fuente de abastecimiento para 75 millones de mexicanos (Jiménez *et al.*, 2005).

En VSLP la calidad del agua para consumo humano se encuentra deteriorada. La unidad acuífera profunda, presenta contaminación de tipo natural debido a la presencia de altas concentraciones de flúor asociadas al medio geológico por el cual circula el agua (Cardona, 1990; Carrillo, 1996; Carrillo, 2002; Cardona 2007), incluso rebasando el límite permitido de 10 ppm establecido en la NOM-127-SSA1-1994.

En el caso del acuífero somero, se presenta una excesiva contaminación de tipo antropogénica debido a que éste acuífero se encuentra bajo la zona urbana a una profundidad que va de 3 a 10 m. Los contaminantes que pueden encontrarse como producto de las actividades urbanas, agrícolas e industriales actuales son coliformes fecales y totales, grasas y aceites,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , sólidos totales disueltos y metales (Morán, 2010). Estos últimos también tienen su origen en los residuos mineros depositados hace 500 años.

Considerando las condiciones naturales y antropogénicas, el valor que se obtuvo para Q fue de 78.3. Éste valor se alcanza debido a que la principal fuente de abastecimiento de agua es el acuífero profundo.

### 3.1.3. Uso

Los cambios de uso de suelo en el VSLP han modificado los usos del agua. Como se menciono anteriormente a principios del siglo XIX, el agua subterránea era usada principalmente para uso doméstico e irrigación de pequeños huertos. Sin embargo, en los últimos 50 años se han dado cambios muy drásticos en los usos de agua para la industria y agricultura y particularmente entre 2005 a 2007. De tal forma que el primer uso tuvo un incremento aproximado del 25%, mientras que el uso agrícola registra un decremento promedio anual de 7%.

En lo que respecta al agua de uso agrícola, la eficiencia de su uso depende del sistema de riego que se utilice (Fernández, 2005). En el caso del VSLP, el principal sistema de riego es por gravedad cuya eficiencia máxima se estima en un 50%.

Para 2005 el volumen de aguas residuales tratadas en el VSLP, fue de 15.5 Mm<sup>3</sup>, de los cuales el 0.03% es de origen industrial (INTERAPAS, 2010). Éste porcentaje representa solo el 4% del volumen total de agua para uso industrial que recibe tratamiento.

Integrando esta información en la Ecuación II.2, se obtuvo un valor para U en el VSLP de 28.8

### 3.1.4. Acceso

La concentración de la población urbana en solo dos municipios (SLP y SGS) con dependencia del sistema acuífero del VSLP, hace que los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento sean principalmente para ésta población. El resto de los municipios cuentan con menos población y poco concentrada lo cual dificulta el acceso a éstos servicios.

Según Lawrence *et al.* (2002), la dotación mínima aceptable para cubrir las necesidades básicas de una población es de 50 litros habitante por día y una dotación mayor a 150 litros habitante por día, se puede considera un exceso. Para el VSLP, de acuerdo a los datos oficiales es de 200 litros habitante por día. Sin embargo, al interior de la zona metropolitana la distribución del abasto de agua es heterogénea en sus 596 colonias, de las cuales 499 tienen abasto permanente con presión normal, el resto tiene un abastecimiento irregular (SEMARNAT, 2008).

Para el área de estudio se obtuvo un valor de 75.2 el cual se explica debido al crecimiento tan acelerado de la zona urbana del VSLP, así como al desarrollo de la industria en los últimos 10 años. Crecimiento de la mancha urbana fue de 32% entre 2000 y 2005 sobrepasando a la registrada entre 1990 y 2000 que fue de 29%, mientras que en el año 2000, el número total de habitantes de la zona urbana era equivalente al 38% del total de la población del estado (Noyola *et al.* 2009).

### 3.1.5. Capacidad

México es un país con una gran diversidad climática, cultural, social. En base al Banco Mundial en 2005, México tuvo el ingreso nacional bruto per cápita más alto de Latinoamérica, consolidándose como un país de ingreso medio alto.

Una de las razones principales de las diferencias en las puntuaciones es la escala a la que se realizó la evaluación. Es decir, las condiciones geográficas, climatológicas y socioeconómicas son diferentes si se miden a nivel nacional o regional. Índices nacionales comúnmente no reflejan las condiciones regionales.

Otra causa del valor obtenido para este componente está relacionado con el organismo operador de agua potable y saneamiento de carácter intermunicipal, cuya operación es deficiente como lo muestran sus datos oficiales. Según datos del 2005, del total del volumen producido, solo el 59% es facturado, y de este porcentaje solo el 29% tiene un pago regular (INTERAPAS, 2010).

En la zona urbana del VSLP se encuentra la principal actividad económica de la región que es la industria. Lo cual no se ha visto reflejado en mejores condiciones de desarrollo humano para los habitantes de la región. La causa de lo anterior está en la concentración de la población y de los servicios públicos en la zona metropolitana del VSLP. Estas condiciones se ven reflejadas en la puntuación obtenida para este componente que es de 62.6

### 3.1.6. Medio Ambiente

Para evaluar el componente del Medio Ambiente se considero el área que ha sido afectada por las actividades antropogénicas en el VSLP.

La evaluación se estableció dentro de una escala de afectación de 0 a 100 por ciento, de tal forma de 0 a 20 se considera una alteración muy bajo, de 20 a 40 es baja, de 40 a 60 es medio, de 60 a 80 por cierto es alta y de 80 a 100 es muy alta. De esta forma si se obtiene una evaluación de 0 a 20 por ciento, esta sería el valor más favorable para el IPA pues representaría una alteración pequeña de la vegetación natural. El caso contrario sería si se obtiene una evaluación de 80 a 100 por ciento, pues esto representaría la pérdida casi total de la vegetación natural dentro la cuenca.

El valor obtenido para este componente en el VSLP fue de 40 puntos, el cual está directamente relaciona con la pérdida de vegetación natural dentro de la cuenca.



en el manejo del recurso. Si bien el Recurso es limitado debido a sus características naturales, el resto de los componentes puede mejorarse a través de una mejor gestión, manejo y administración del recurso.

En la Tabla II.2 se presenta la puntuación obtenida para cada componente, su peso; así como, el resultado global del Índice de Pobreza del Agua para el Valle de San Luis Potosí, cuyo valor fue de 46 puntos.

Si comparamos este valor con los obtenidos por Lawrence *et al.*, en 2002, este valor está alejado de los países desarrollados y el VSLP se encuentra al nivel de los países subdesarrollados considerados con pobreza hídrica, en otras palabras, es una región en condiciones de pobreza hídrica.

Tabla II.2. Valores obtenidos para cada componente del IPA para VSLP.

<b>Componente</b>	<b>Calificación</b>	<b>W</b>	<b>IPA</b>
Recurso	0.26	30	46
Calidad	0.74	20	
Uso	0.29	20	
Acceso	0.75	10	
Capacidad	0.63	10	
Medio Ambiente	0.40	10	

Considerando que el valor máximo o ideal es de 100, el valor obtenido para el VSLP, resulta inquietante, lo cual indica que deben analizarse no solo en la forma de manejo, gestión y uso del recurso, sino también buscar el vínculo con el bienestar socioeconómico para la población del VSLP.

## II.5. Conclusiones

El componente del IPA que se refiere al recurso (R), para el caso de VSLP es uno de los componentes más importantes del IPA; sin embargo, para el caso del VSLP el valor obtenido es 25.8, considerado como bajo. Lo cual puede tener su origen en dos aspectos uno natural y otro antropogénico; la natural se debe a la casi nula recarga de la principal fuente que es el acuífero profundo, que se encuentra en condiciones de minado. La antropogénica es causada por la concentración de parovechamientos y la alta extracción del recurso en la zona urbana.

El componente de Uso (U), está estrechamente ligado con los volúmenes e extracción para los diferentes usos, en este caso el principal uso público urbano %, agrícola % e industrial %. En todos los casos la eficiencia con la que se aprovecha el agua es deficiente. Lo cual se refleja en el valor 28.8 para Uso.

Las fuentes de abastecimiento del agua en el VSLP son el acuífero somero y el acuífero profundo. En ambos casos presentan problemas de calidad. El primero está asociado a un origen antropogénico, debido a que se encuentra bajo la zona urbana. El profundo presenta altas concentraciones de fluor de origen natural. Estas condiciones se ven reflejadas en el valor de 73.8 para la calidad.

A pesar de que el acceso al agua potable en la zona metropolitana asentada en el VSLP es alto (86%), el agua residual generada no es totalmente tratada (70 %). Por otro lado, en las zonas agrícolas el acceso al agua para esta actividad es de 28% que es considerado bajo. La integración de estos subcomponentes dan como resultado un valor de 75.2 de Acceso.

La zona metropolitana del VSLP concentra el 40% de la población y el 78% del PIB estatal, en donde la industria es la principal actividad económica; sin embargo, no se ha visto reflejado en el bienestar de la población como lo muestra el valor obtenido de 62.6 para el componente de Capacidad.

El área de estudio cuenta con una extensa área natural protegida que representa el 22% del área total de estudio. Sin embargo ha sido alterada en un 60% en su vegetación natural, lo cual da como resultado un valor bajo de 40 para el componente Ambiental.

La metodología es de fácil implementación siempre y cuando exista la información confiable y disponible, arroja resultados que sintetizan las condiciones socioambientales de la región en que se aplican.

## II.6. Bibliografía

Banco Mundial, 2005. Global competitiveness index rankings and 2005 comparisons. Disponible en: [https://members.weforum.org/pdf/Global\\_Competitiveness\\_Reports/Reports/gcr\\_2006/gcr2006\\_rankings.pdf](https://members.weforum.org/pdf/Global_Competitiveness_Reports/Reports/gcr_2006/gcr2006_rankings.pdf) Consultado el 22 de Febrero de 2012.

Brown, R. y McClelland, N., 1973. Water Quality Index. Application in the Kansas River Basin. Conf., Water Poll. Fed., Cleverand, Ohio.

Cardona, A., 2007. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 252 p.

Cardona, A., Martínez, J.E., Alcalde, R. y Castro, J., 2006, La edad del agua subterránea que abastece la región de San Luis Potosí: Revista Universitarios Potosinos, Año 2 (7), 20-25.

Cardona, A., 1990. Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo: México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 97 p.

Carrillo, J. J., A. Cardona, y Edmunds, W. M., 2002. Use of abstraction regime and knowledge to control high-flouride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. Journal of Hydrology, 261, 24-47.

Carrillo, J. J., Cardona, A. y Moss, D., 1996, Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México: Journal of Hydrology, 185, 23-44.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2011. Estadísticas del agua en México 2011.

Comisión Nacional del Agua (CNA), 2002. Determinación de la disponibilidad del agua en el acuífero San Luis Potosí estado de San Luis Potosí. 27 p.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2012. Áreas Protegidas Decretadas. Disponible en: [http://www.conanp.gob.mx/que\\_hacemos/](http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/) Consultado el 25 de Enero de 2012.

Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2005. Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 "San Luis Potosí" en el Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, reporte, 74 p.

Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), 2007. Nota Técnica sobre la Aplicación de la Metodología para la Medición de la Pobreza por Ingresos y Pruebas de Hipótesis 2006, 12 p.

Diario Oficial de la Federación, 2007. Acuerdo por el cual se dan a conocer los estudios técnicos del acuífero 2411 San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí. 7 de Julio de 2010.

Diario Oficial de la Federación, 2009. Aviso se informa al público en general, que está a su disposición el Estudio Técnico Justificativo para la creación de un Área Natural Protegida denominada “Sierra de San Miguelito” localizado en los Municipios de San Luis Potosí, Mexquitic de Carmona, Villa de Reyes y Villa de Arriaga del Estado de San Luis Potosí.

Dudley, N. 2008. Directrices para la aplicación de las categorías de gestión de áreas protegidas. Gland, Suiza: UICN. , 96 p.

Fernández, R., 2005. El impacto de la tarifa eléctrica subsidiada sobre la adopción de tecnología de riego. Tesis de licenciatura, escuela de Ciencias sociales, Universidad de las Américas Puebla. 94 p.

García, E., 2004, Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen: México, D.F, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, Serie Libros, 5a ed., 90 p.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2007. Censo Agropecuario, VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal, 2007

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2005a. II Conteo de Población y Vivienda 2005.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2005b. Sistema de cuentas Nacionales de México. Producto Interno Bruto por Entidad Federativa 2005.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1983. Carta Estatal de vegetación y Uso de Suelo actual, escala 1:1000000.

Jiménez, B. y Marín, L., 2005. El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. Edición digital 2005, 404 p.

Lawrence, P., Meigh, J. y Sullivan, C.A., 2002. The water poverty index: international comparisons. Keele Economics Research Papers, 19 p.

Marín, L.E., 2002. Perspectives on Mexican Ground Water Resources. Ground Water, Vol. 40 No.6, p 570-571.

Moran, J., 2010. Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura, Área de Ciencias de Químico Biológicas, Universidad del Noreste, 68 p.

Moreno, D., Campos, F. y Cisneros, F., 2004. Estadística climatológica del observatorio meteorológico de San Luis Potosí. Facultad de ingeniería de la UASLP. Comisión Institucional de Apoyo a la Docencia. 79 p.

Noyola, M. C., Ramos, J. A., Domínguez, E., Pineda, L. F., López, H. y Carbajal N., 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24, p 395-410.

Oswald, U., 2003. El recurso agua en el alto balsas. Universidad Autónoma de México, Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias, 654 p.

Organismo intermunicipal metropolitano de agua potable, alcantarillado saneamiento y servicios conexos de los municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez (INTERAPAS), 2010. Estudio de Diagnóstico y planeación integral. Disponible en: [www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica//varios/Taller%20Mi g/DIP%20INTERAPAS%20\(abril-2011\)\\_Parte2.pdf](http://www.cmic.org/comisiones/sectoriales/infraestructurahidraulica//varios/Taller%20Mi g/DIP%20INTERAPAS%20(abril-2011)_Parte2.pdf) Consultado el 23 de Enero de 2012.

Peña, F., 2006, Abasto de agua a la ciudad de San Luis Potosí, en Barkin, D. (ed.), La Gestión del Agua Urbana en México: México, Universidad de Guadalajara, p 249-264.

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo/México (PNUD/México), 2000-2005. Índice de Desarrollo Humano Municipal en México 2000-2005, Nota técnica 4, 3 p.

Ramos, J.A., López-Loera, H., Martínez-Ruiz, V.J., Aranda-Gómez, J.J., 2007. Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, Mexico) inferida a partir de datos geoeléctricos: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 24, p 31-46.

Ramos, J.A., 2002. Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato. Tesis de doctorado, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, 106 p.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008, Boletín del Archivo Histórico del Agua. Año 13, No. 40, Septiembre- diciembre 2008, 89 p.

Sullivan, C.A., Meigh, J.R., Giacomello, A.M., Fediw, T., Lawrence P., Samad, M., Mlote, S., Hutton, C. allam, J.A., Schulze, R.E., Dlamini, D.J.M., Crosgron, W., Delli Priscoli, J. Gleick, P., Smout, I. Cobbing, J., Calow, R., Hunt, C., Hussani, A.,

Acreman, M.C., King, J. Malomo, S., Tate, E.L., O'Regan, D., Milner, S. y Steyl, I. , 2003. The water poverty index: development and application at the community scale. Natural Resources Forum, p 189-199.

Sullivan, C.A., Meigh, J.R. y Fediw, T.S., 2002. Derivation and Testing of the Water Poverty Index Phase 1. Final Report, Vol. 1. Center for Ecology and Hydrology, 43 p.

Sullivan, C. A., 2002. Calculating a water poverty index. World Development Vol. 30, No. 7, p 1195-1210

Sullivan, C. A., 2001. The Potential for Calculating a Meaningful Water Poverty Index. International Water Resources Association. Water international Vol. 26, No. 4, p. 471-480.

Verbst, K., Santibañez, F., Gabriels, D. y Soto G., 2010. Atlas de Zonas Áridas de América Latina y el Caribe. Documento Técnico del PHI-LAC, N°25. p. 48.

# III

## MODELO DE FLUJO DEL SISTEMA ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ

### **III.1. Introducción**

En los capítulos anteriores se abordaron temas importantes como el cambio de uso de suelo y su impacto en el acuífero colgado a lo largo de la historia de la ciudad de SLP. Mediante el IPA, se estableció la relación que existe entre el bienestar de la población de la zona de estudio con la disponibilidad de agua.

Ambos temas, permitieron tener un mejor entendimiento de la problemática actual del agua subterránea en VSLP; sin embargo, es importante también realizar la evaluación de éste recurso para definir alternativas de manejo y gestión del agua subterránea.

En este capítulo se presenta una herramienta de evaluación como lo es la modelación numérica a través de los modelos de flujo, los cuales han utilizado para predecir esquemas de manejo y pronóstico de los efectos del bombeo en el agua subterránea (Anderson y Wang, 1982).

Los primeros trabajos de modelación matemática desarrollados en México fueron desarrollados por Cruikshank (1982) y Herrera (1982 y 1989) en la cuenca de México. En las últimas década fueron desarrollados 18 modelos matemáticos para el manejo del agua subterránea en el Estado de Guanajuato (Chávez, et al., 2006). En SLP se han realizado estudios (SARH-CNA-UNAM, 1992; Difurt et al., 1995 y CNA, 1996-a) relacionados con modelos matemáticos del sistema acuífero del Valle de San Luis Potosí (VSLP). Khon-Ledesma (2010) desarrolló un modelo de flujo del acuífero de SLP para proponer alternativas de extracción que produzcan menor desequilibrio del acuífero.

### **III.2. Modelo conceptual**

Este modelo comprende del sistema acuífero del VSLP es de una extensión que va desde el aeropuerto al Norte de la ciudad de San Luis Potosí hasta el poblado de La Pila al Sur del valle, y desde límites de la SSM al Oeste hasta límites de la SA al Este. La topografía fue obtenida de los modelos digitales del terreno (INEGI, 2007). El modelo conceptual está formado por un basamento hidrogeológico de calizas arcillosas con estratificación delgada y baja conductividad hidráulica. Un acuífero profundo formado por rocas volcánicas fracturadas y un acuífero somero granular (Figura 5). Cabe mencionar que no fue considerado el acuífero colgado dentro de la modelación.

#### **III.2.1. Propiedades del acuífero**

Las estimaciones iniciales para el coeficiente de almacenamiento, transmisividad y almacenamiento específico para el dominio del modelo se usaron valores reportados en estudios previos (Cardona-Benavides, 1990, 2007; Carrillo-Rivera et

al., 1992, 2002); así como, valores comúnmente aceptados en la literatura para materiales similares al área de estudio (Figura III.1).

### **III.2.2. Cargas hidráulicas y evolución hidrogeológica**

Las cargas hidráulicas iniciales corresponden al periodo de 1986. Las elevaciones del Nivel Estático (NE) para este año presentan valores que van de 1740 a 1757 msnm, con una diferencia de niveles de 17 m. La menor elevación se encuentra ubicada al centro del VSLP, en la zona urbana; y las mayores se ubican hacia el norte, sur y noreste del VSLP. En el año de 1995 las elevaciones del NE van de 1695 a 1805 msnm, con una diferencia de niveles de 110 m. Para el año 2007, las elevaciones del NE van de 1872 a 1673 msnm, con una diferencia de niveles de 199 m.

La secretaria de Recursos Hidráulicos (SARH, 1977), definió que la dirección de flujo subterráneo es de la periferia del valle hacia la zona urbana. Lo cual puede considerarse como la primera etapa de la generación del cono de abatimiento. Martínez y Aguirre (1984), reportan para el primer semestre del año de 1984 un descenso del nivel estático de 1.5 a 2 metros anuales en el período de Junio de 1983 a Junio de 1984. Para 1986, Martínez determina que en el centro de la zona urbana de la Ciudad de SLP los niveles estáticos varían 140 m y en su periferia, 130-120 m; mientras que en la zona norte y noreste (Cándido Navarro y Peñasco) de 75 y 70 m, respectivamente. Esto confirma que los flujos son de tipo radial de la periferia del valle hacia el gran cono de abatimiento en la zona urbana de SLP con un descenso de de 2.6 m/año.

Basados en la red piezométrica del 2003, se observa que predomina el cono de abatimiento de la ciudad de San Luis Potosí. Los gradientes hidráulicos convergen hacia el cono de abatimiento regional. El cono se ha profundizado 60 m de 1971 a 1995 (CNA, 1996-b). Considerando la evolución del nivel estático para el periodo de 1995-2001, se observa que durante el lapso de 6 años la profundidad del nivel estático aumentó hasta 25 m en el centro del cono de abatimiento y se desarrolló hacia la parte norte. Sin embargo, en ciertas zonas no hubo abatimiento de los niveles (COTAS, 2005). En año 2007 se observa una nueva dirección de expansión del cono de abatimiento, el cual se dirige del centro de la zona urbana de SLP hacia el sur de la ciudad.

Para la calibración se utilizaron datos históricos de niveles estáticos de 21 pozos de la red de monitoreo del acuífero profundo. La profundidad de los pozos varía de 200 a 726 m.

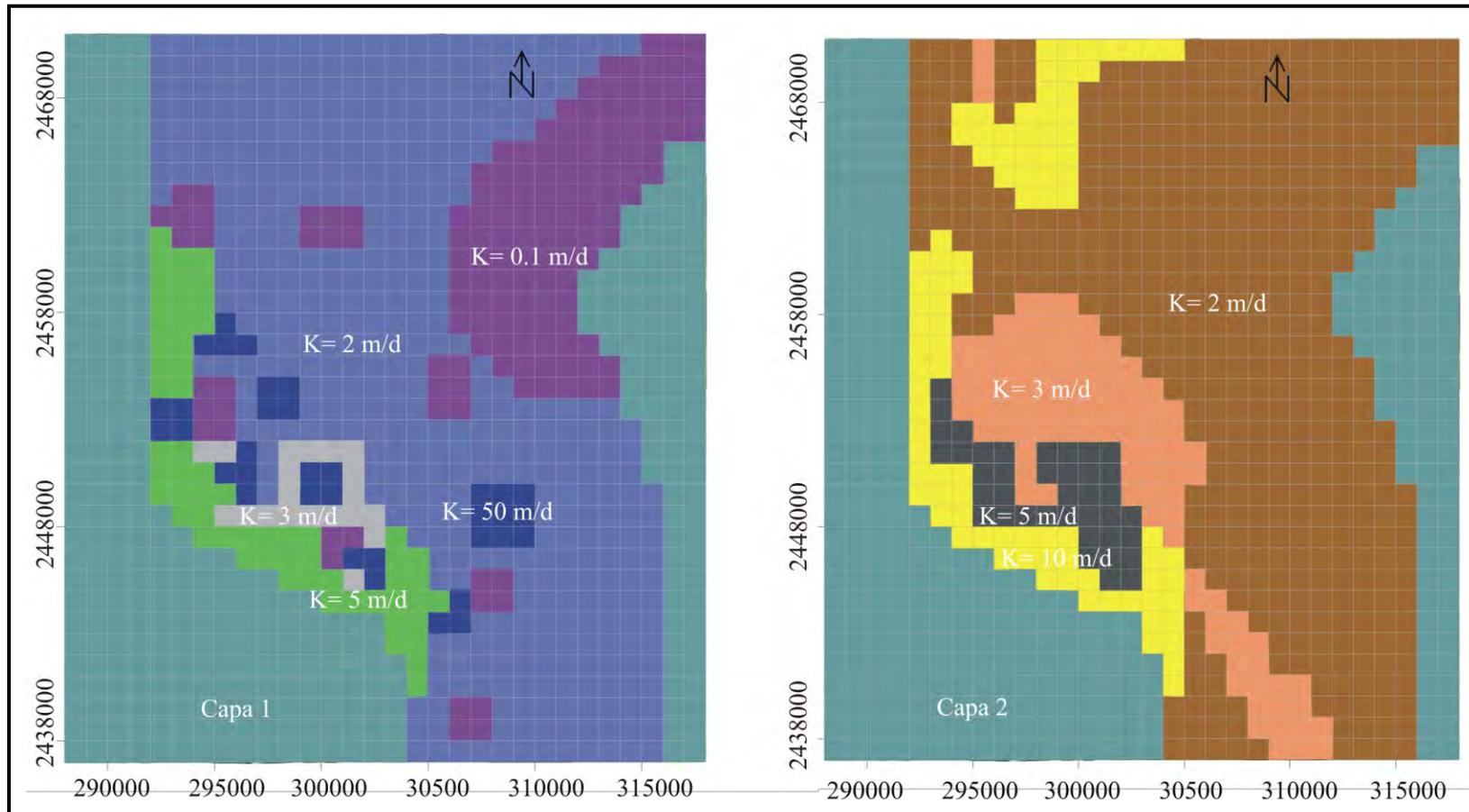


Figura III.1. Conductividad hidráulica asignada por zonas en el área de estudio a) Capa 1 (acuífero granular, b) Capa 2 (acuífero fracturado).

### III.2.3. Recarga y aportes laterales

Las principales fuentes de recarga del agua subterránea para el acuífero somero en el área de estudio son la precipitación, flujo lateral del frente de las Sierras aledañas y el flujo por retorno de riego. Los ríos que cortan el valle son intermitentes por los que no se les considero como elementos de recarga del acuífero. Sin embargo, en la zona agrícola de SGS se encuentran canales a cielo abierto por los que circula agua residual constantemente y se genera una recarga de tipo artificial debida a los retornos de riego, la cual se dirige hacia el acuífero colgado.

Las recargas laterales procedentes de la SSM y la SA que constituyen las áreas orográficas más importantes del VSLP tienen muy poca aportación debido a la baja permeabilidad, lo cual hace muy difícil la infiltración hacia el subsuelo y su influencia es sobre el acuífero colgado.

Se considera que no existe recarga del acuífero colgado hacia el medio granular debido a la existencia de una delgada capa de arcilla o de caliche que impide la comunicación entre estas dos unidades.

La recarga del acuífero fracturado, se genera principalmente de los aportes laterales del flujo regional. Las sierras de SSM y la SA representan un aporte mínimo para este acuífero.

Para el modelo, se establecieron tres zonas de recarga diferenciada, la primera y de mayor influencia fue para la zona agrícola; la segunda, sobre la zona urbana y la tercera, para el resto de valle (Figura III.2).

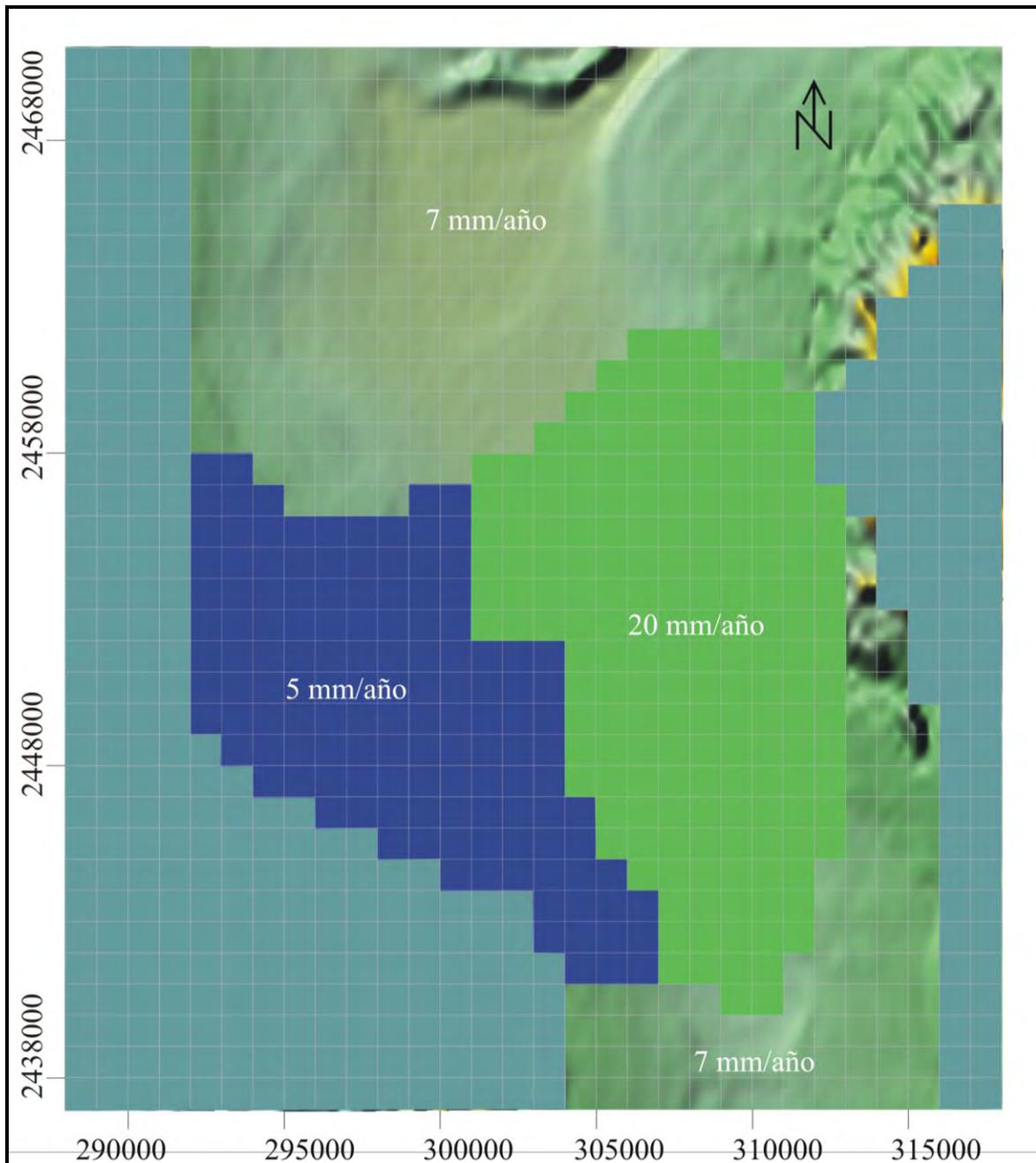


Figura III.2. Distribución de tasas de recarga en el modelo.

#### III.2.4. Extracciones

La extracción de agua subterránea del acuífero profundo produce un abatimiento promedio del orden 1.3 m/año. En general, el abatimiento en el acuífero profundo varía entre 1 y 50 m; sin embargo, el promedio para los pozos apostados en rocas volcánicas y medio granular es de 20 y 14 m respectivamente.

Un análisis del volumen total extraído del acuífero a través del bombeo para sus diferentes usos, fue realizado por INTERAPAS (2004) para el periodo de 1995 a 2005. En base al volumen de agua que cada tipo de uso demandaba (Tabla III.1), se estableció que el uso y consumo humano era el principal volumen de extracción, seguido del industrial y el agrícola (Figura III.3)

La descarga principal en el área de estudio es por bombeo para usos doméstico e industrial en la ciudad del VSLP y el bombeo para irrigación en los municipios aledaños. El volumen concesionado de extracción para el acuífero es de  $136 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año (INTERAPAS, 2004). Se utilizaron pozos puntuales individuales para representar el bombeo concentrado en la ciudad del VSLP.

Tabla III.1. Extracciones anuales en el periodo 1995-2005 por tipo de uso ( $1 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/año).

<b>Año</b>	<b>Uso y consumo humano</b>	<b>Uso Agrícola</b>	<b>Uso Pecuario</b>	<b>Uso Industrial</b>	<b>Otros Usos</b>	<b>Total Anual</b>
<b>1995</b>	66.09	5.72	0.50	6.80	1.93	81.04
<b>1996</b>	67.58	19.55	0.43	7.60	1.93	97.09
<b>1997</b>	69.06	16.97	0.45	8.41	1.93	96.82
<b>1998</b>	70.55	18.92	0.92	9.21	1.93	101.53
<b>1999</b>	72.03	21.93	1.02	10.02	1.93	106.93
<b>2000</b>	73.51	20.15	1.52	10.82	1.93	107.94
<b>2001</b>	77.20	16.59	1.54	11.63	1.93	108.88
<b>2002</b>	78.64	16.32	1.55	12.44	1.93	110.87
<b>2003</b>	85.99	16.98	1.55	13.24	1.93	119.69
<b>2004</b>	89.97	8.57	1.55	13.24	1.93	115.26
<b>2005</b>	90.82	8.57	1.55	13.24	1.93	116.10
Porcentaje extraído por tipo uso para 2005	78.2%	7.4%	1.3%	11.4%	1.7%	

Fuente: INTERAPAS 2004.

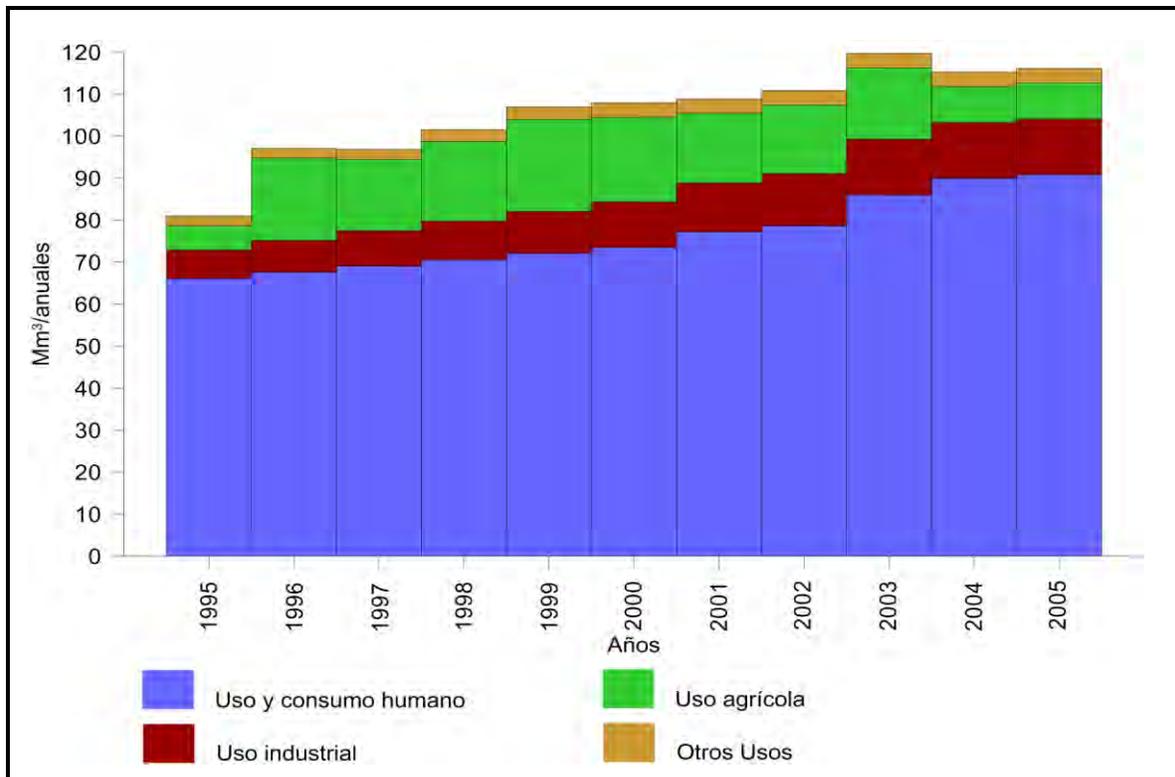


Figura III.3. Hidrógrafo de las extracciones durante el periodo de 1995-2005 por tipo de uso (INTERAPAS 2004).

### III.2.5. Balance de agua subterránea

Los dos balances más recientes hechos por el COTAS (2005) fueron para los años de 1995 y 2002, en el primero se definió un déficit de 36.66 Mm<sup>3</sup>/año. Para el año 2002, se tiene un déficit calculado de 42.5 Mm<sup>3</sup>/año producto de la extracción de 120.6 Mm<sup>3</sup>/año y una recarga de 78.1 Mm<sup>3</sup>/año.

Sin embargo; recientemente se ha reportado que la recarga hacia el acuífero profundo es casi nula (Noyola *et al.*, 2009).

Cabe mencionar que en estos balances se mezcla de forma equivocada la información de precipitación, evapotranspiración, escurrimiento con el bombeo del acuífero profundo. En este trabajo se considera que el acuífero colgado no está conectado con el acuífero profundo por lo que los parámetros hidrológicos mencionados sólo afectan al colgado. Como ya se mencionó existen evidencias geológicas, hidrogeoquímicas y de edad del agua de la no conectividad hidráulica entre el acuífero colgado y el profundo. Considerando para el acuífero colgado una precipitación de 354 mm/año, una evapotranspiración de 353.96 mm/año, un escurrimiento de 11.97 Mm<sup>3</sup>/año y una extracción de 5 Mm<sup>3</sup>/año, se obtuvo un

déficit de 16.9 Mm<sup>3</sup>/año. Valor que no corresponde con los reportados en los balances anteriores.

Por lo anterior es conveniente realizar balances de forma separa para cada unidad acuífera.

### III.3. Modelo numérico

El modelo numérico de flujo fue construido utilizando el algoritmo de MODFLOW (McDonald y Harbaugh, 1988) el cual se basa en diferencias finitas en bloque centrado y una interfase gráfica para tres dimensiones. El modelo de flujo fue calibrado para corridas en condiciones estacionarias.

#### III.3.1. Ecuaciones

El movimiento tridimensional del agua subterránea de densidad constante a través de un medio poroso puede ser descrito por la ecuación diferencial parcial:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. III.1})$$

Donde  $h$  es la carga hidráulica (L),  $t$  es el tiempo (T),  $K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  y  $K_{zz}$  son valores de la conductividad hidráulica a lo largo de los ejes coordenados  $x$ ,  $y$  y  $z$  que se suponen paralelos a los ejes principales de la conductividad hidráulica (LT<sup>-1</sup>),  $W$  es la tasa de flujo volumétrico por unidad de volumen y representa fuentes y/o sumideros de agua (T<sup>-1</sup>) y  $S_s$ , es el almacenamiento específico del material poroso (L<sup>-1</sup>).

El código de computadora MODFLOW desarrollado por la USGS (McDonald y Harbaugh, 1996) se utilizó para resolver el modelo de flujo y el pre- y posprocesador Visual MODFLOW (VM) Pro, versión 4.1, un producto propiedad de Waterloo Hydrogeologic Inc., 2005 se usó para graficar los datos de entrada, para análisis y presentación de los datos de salida.

#### III.3.2. Discretización espacial y temporal

La discretización del modelo de flujo en diferencias finitas se muestra en la Figura III.3. La malla contiene 30 columnas y 34 renglones con un espaciamiento constante de 1000 m. Verticalmente, se definieron dos capas del modelo para simular el sistema de flujo regional bidimensional. La primera capa, comprende el material de depósitos aluviales y el medio granular (acuífero somero) y la segunda, constituye el material volcánico fracturado (profundo). Las elevaciones del techo y del fondo de las capas se interpolaron de un modelo geoelectrico del área de estudio.

### III.3.3. Condiciones de frontera

Dentro del área de estudio se definen las fronteras físicas e hidráulicas (Figura III.3). En los bordes este y oeste del modelo cae la interface entre la planicie y los terrenos montañosos de las SSM y la SA, respectivamente. La recarga del frente de las sierras entra lateralmente al sitio de estudio; sin embargo, el límite este y oeste del modelo se definieron como fronteras de no flujo. En las fronteras noreste y suroeste se impusieron condiciones de frontera tipo Dirchlet (carga constante). El valor de la carga constante para 1986 en la frontera noreste y suroeste fue de 1753 y 1744 metros, respectivamente (Martínez y Aguirre, 1987). Para 1995 la carga constante de la frontera noreste, 1745 metros y en la sureste 1735 metros. En 2007 la carga asignada para ambas fronteras fue de 1700 metros.

### III.3.4. Calibración

El modelo numérico fue calibrado para reproducir los niveles medidos del agua subterránea. Ésta calibración incluye dos pasos secuenciales. Primero, se calibro el modelo en estado estacionario y se realizó mediante el ajuste de parámetros de entrada como la conductividad hidráulica y las condiciones de frontera que fueran capaces de reproducir simulaciones cuya condición representara el sistema acuífero predesarrollado hasta obtener la mejor condición del sistema modelado. El criterio de mejor calibración fue a través del Error Cuadrático Medio (ECM). La solución del modelo en estado estacionario proporciona la condición inicial para el modelo en estado transitorio del campo de flujo de 1986 (Figura III.4). El modelo transitorio se calibro contra los niveles del agua medidos disponibles de 1995 y 2007 sobre el dominio del modelo (Figura III.5). Las Figura III.4 y III.5 muestran las diferencias entre los contornos calculados y observados de los niveles del agua subterránea, la cual representa el mejor ajuste.

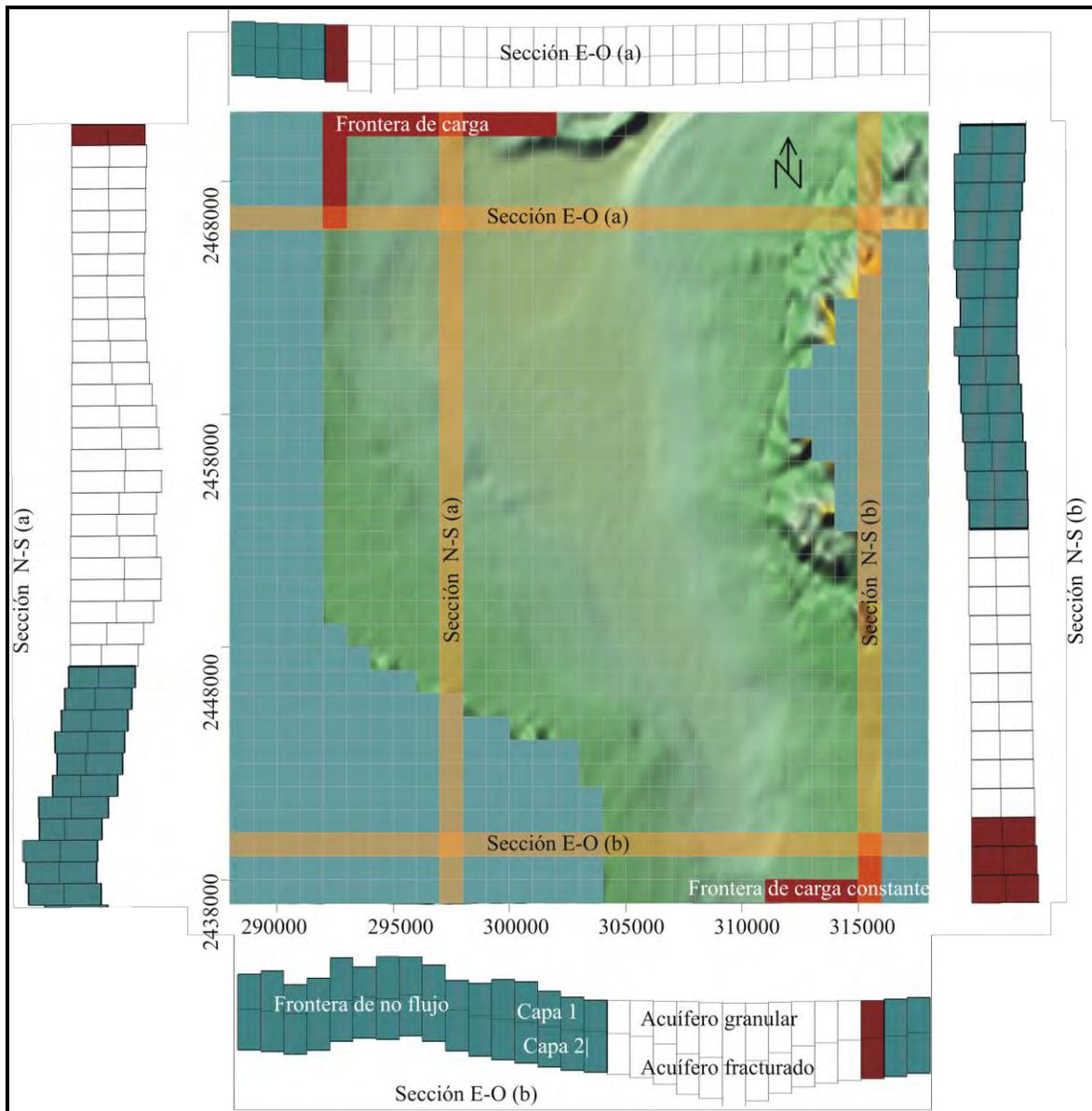


Figura III.4. Discretización espacial y condiciones de frontera del modelo.

### III.4. Resultados y discusión

La modelación numérica ha permitido simular con un ECM de 0.95%, para estado estacionario y 0.27% para estado transitorio para 1986 (Figura III.4). Para estado transitorio en 1995 y 2007 se obtuvieron ECM de 2.44% y 2.25%, respectivamente (Figura III.5b y III.5d).

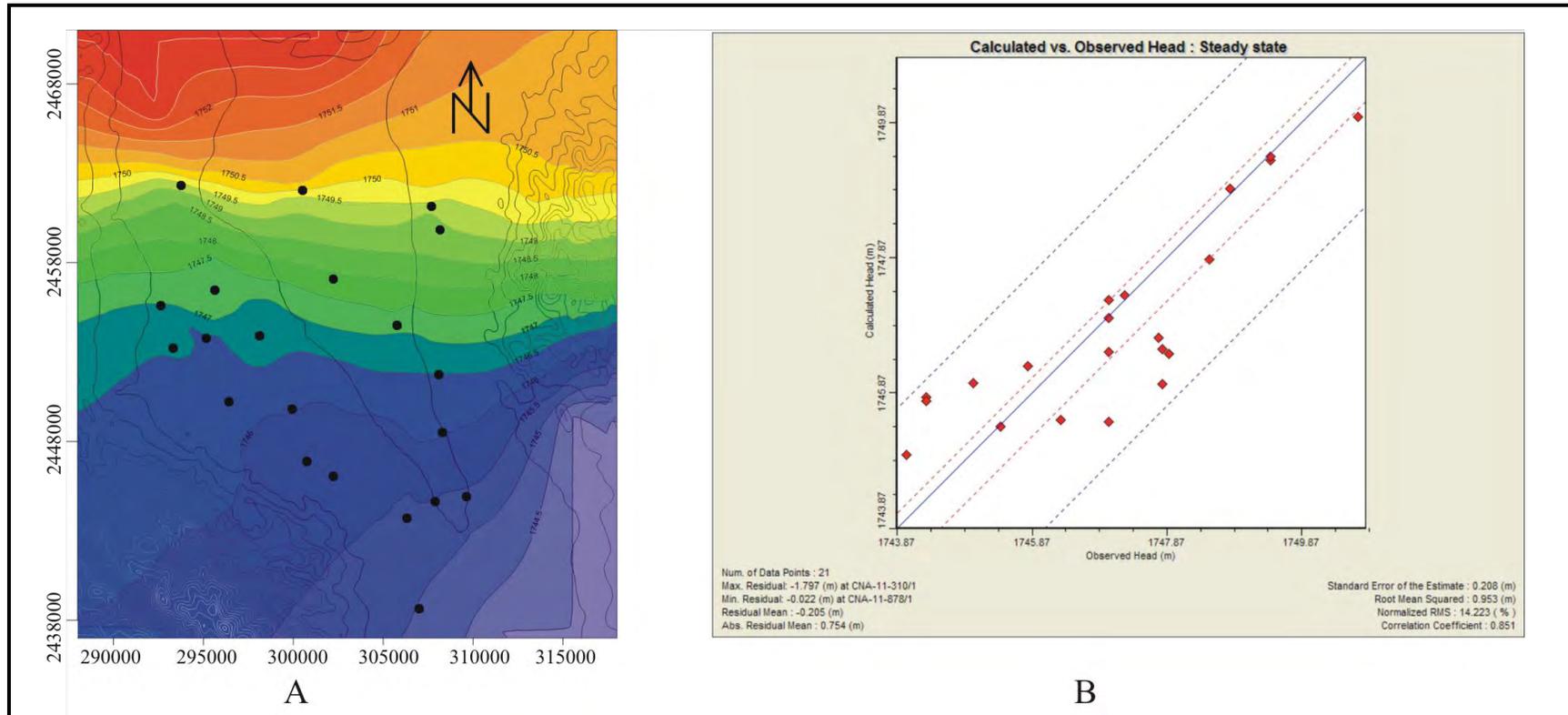


Figura III.5. Simulación y calibración de flujo subterráneo 1986. A: Simulación en estado estacionario; B: Calibración en estado estacionario.

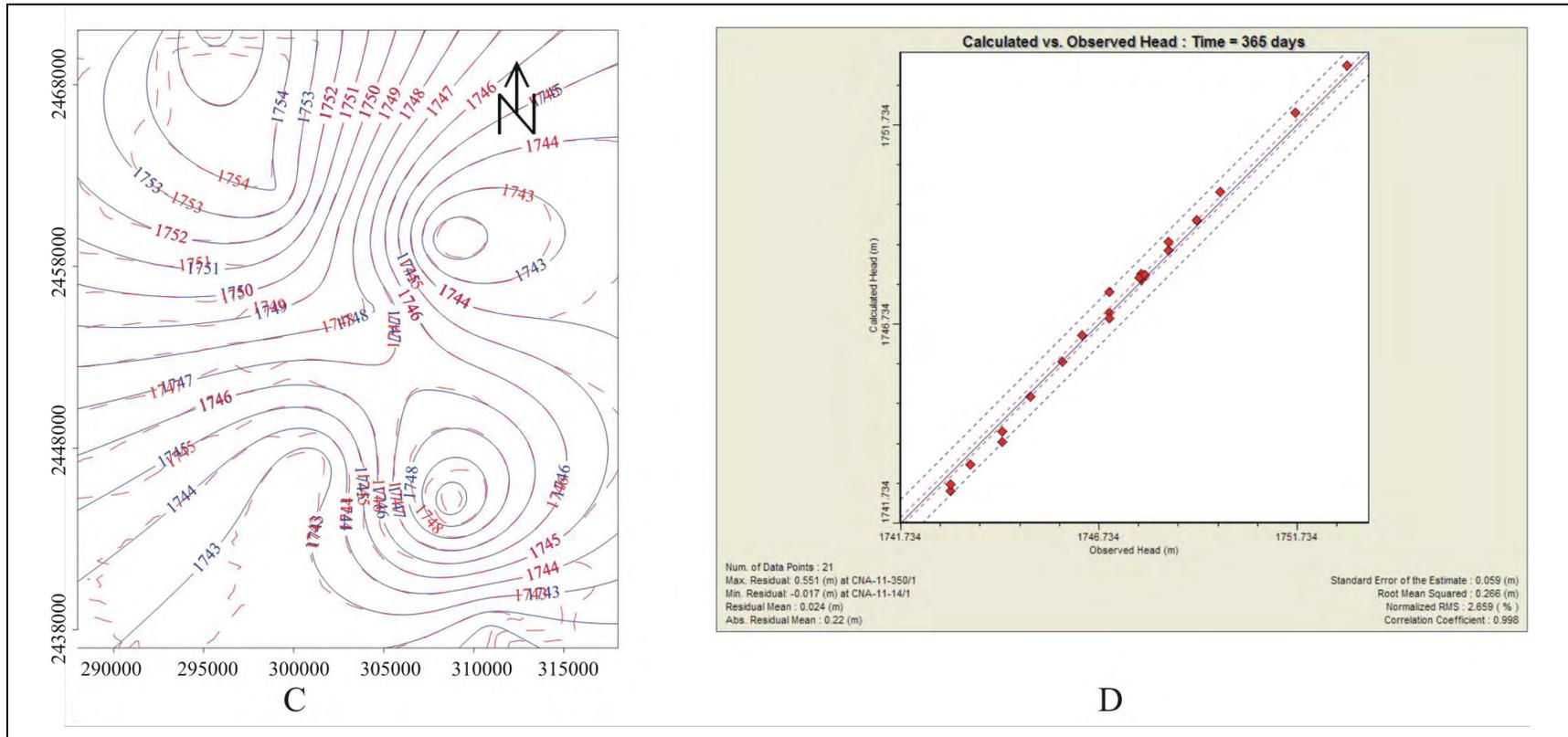


Figura III.5. Simulación y calibración de flujo subterráneo 1986. C: Correlación entre cargas hidráulicas medida y calculadas en estado transitorio, y D: Calibración en estado transitorio. Líneas continuas representan valores de carga hidráulica medidos y las discontinuas los valores calculados.

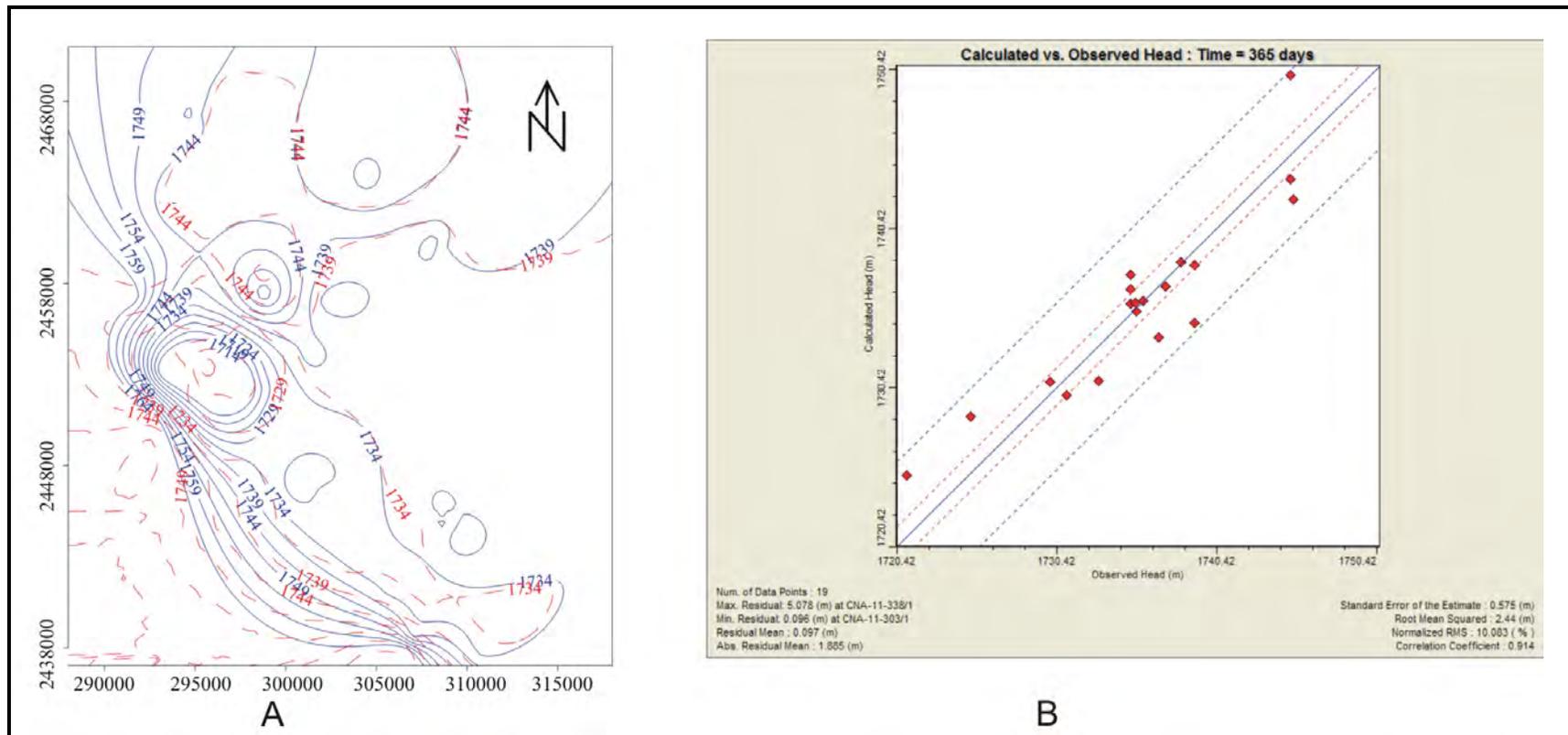


Figura III.6. Simulación y calibración de flujo subterráneo para 1995 y 2005. A: Correlación entre cargas hidráulicas medida y calculadas en estado transitorio para 1995; B: Calibración en estado transitorio para 1995. Líneas continuas representan valores de carga hidráulica medidos y las discontinuas los valores calculados.

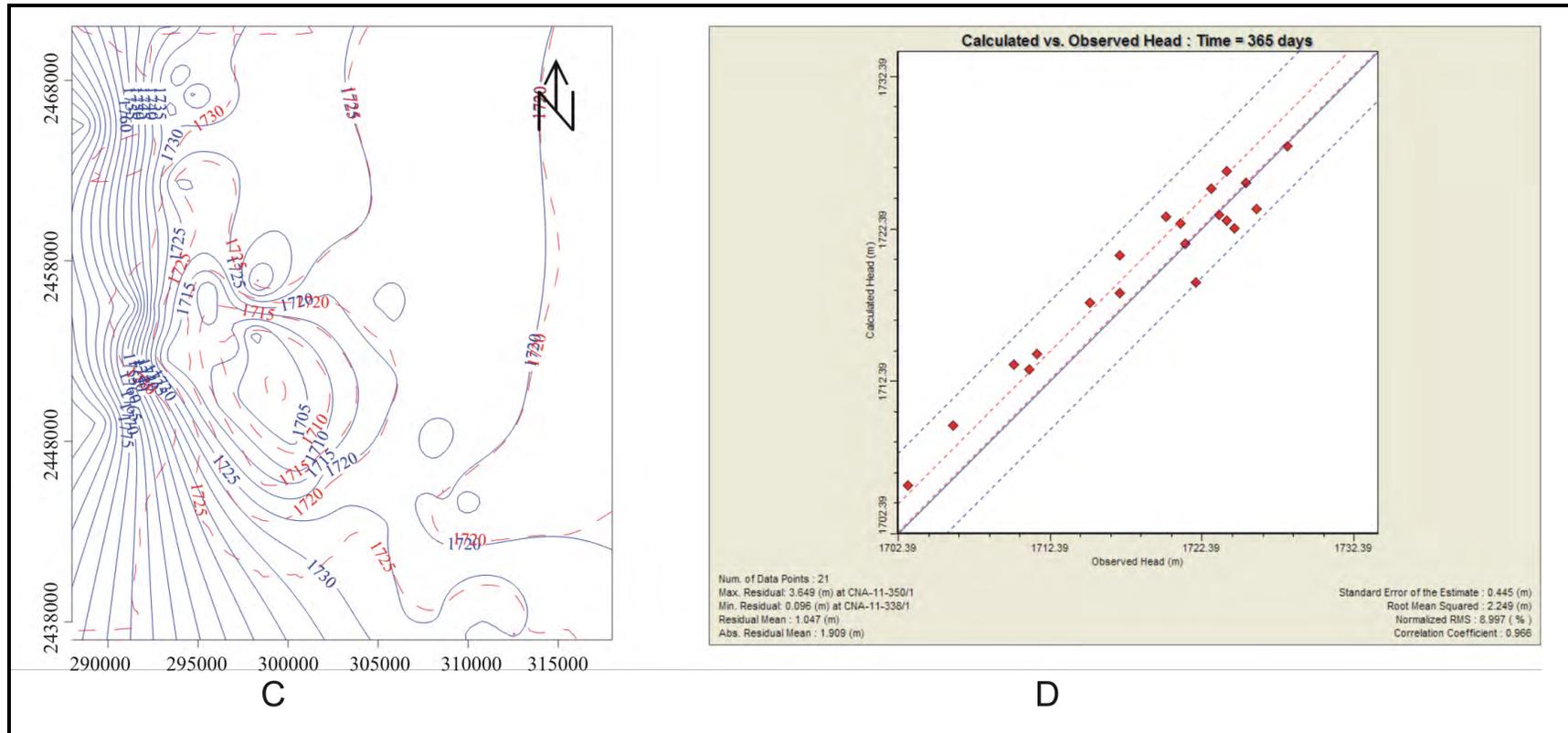


Figura III.6. Simulación y calibración de flujo subterráneo para 1995 y 2005. C: Correlación entre carcas hidráulicas medida y calculadas en estado transitorio para 2007 y D: Calibración en estado transitorio para 2007. Líneas continuas representan valores de carga hidráulica medidos y las discontinuas los valores calculados.

Con el modelo de flujo se pudo establecer la dirección preferencial en condiciones iniciales la cual era muy distinta a la actual, fluía de norte a sur. Con la evolución del acuífero debido a la extracción, las direcciones de flujo fueron cambiando. De tal manera que actualmente los contornos de niveles estáticos muestra que la dirección de flujo es convergente hacia la zona urbana dando lugar a un cono de abatimiento.

En periodo de simulación de 1986 se puede observar que el cono de abatimiento está ubicado principalmente en la zona urbana (centro del valle) y otro hacia el noreste del valle, mientras para el año de 2007, el cono de la zona urbana se ha desarrollado hacia la zona industrial (sur del valle), lo cual se debe, al incremento de la extracción por el cambio de uso de suelo, del agrícola por el industrial.

Con base en el modelo de flujo, considerando proyecciones de crecimiento poblacional y análisis de los cambios de uso de suelo se realizaron simulaciones predictivas para definir escenarios de manejo del agua subterránea, se obtuvo que el volumen establecido por la CONAGUA se alcanzará para el 2021 (Figura III.6).

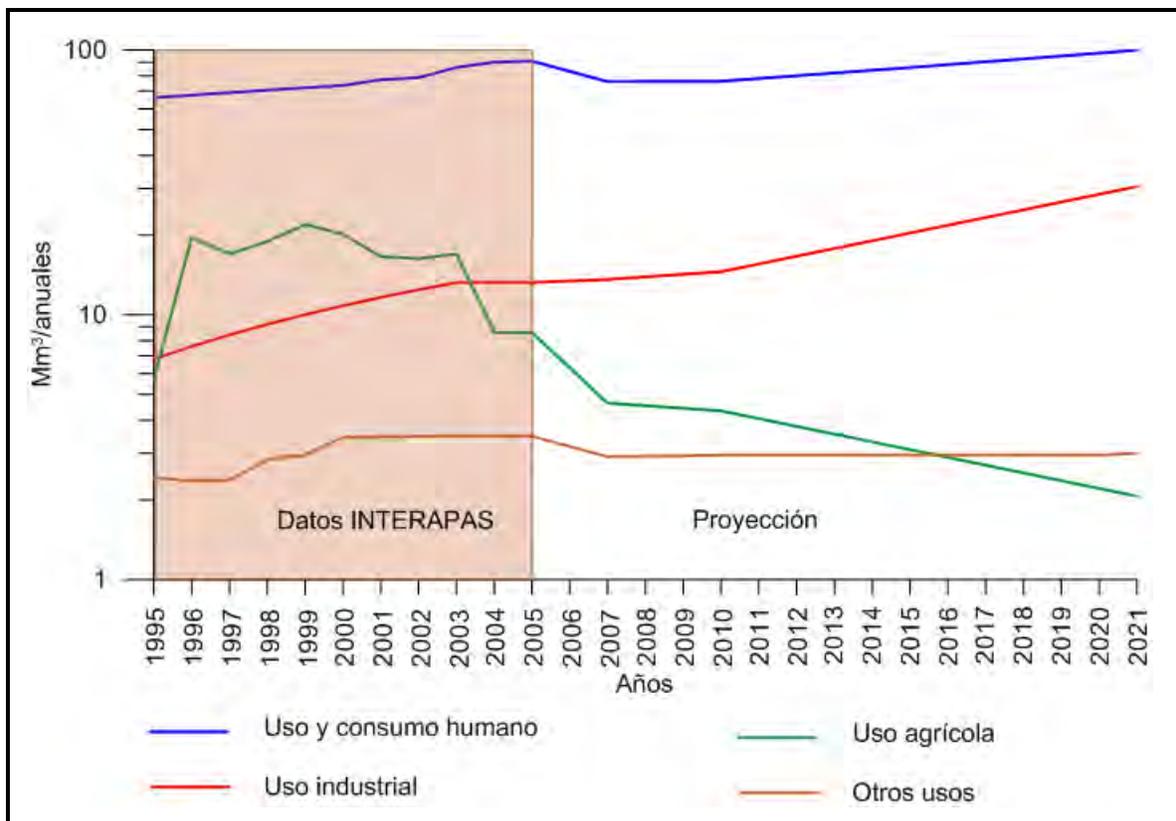


Figura III.7. Extracciones anuales en el periodo 1995-2005 por tipo de uso y su proyección al año 2021 (Mm3/año)

Considerando el desarrollo que ha tenido el área urbana y periurbana del valle a partir de 1950 a la fecha, se realizaron simulaciones predictivas en el que el cambio de uso de suelo entre urbano e industrial son inversamente proporcional al cambio de uso agrícola y esto influye directamente sobre la tasa de recarga en la zona agrícola. Otra forma de ver el intercambio del uso del agua agrícola por industrial es que para 2006 el 7.7% del agua que se extraía era para uso agrícola, para el 2008, este porcentaje cambio a 14%, en dos años la actividad industrial duplicó su demanda, mientras que para el mismo 2006 la agricultura hacía uso del 19.8% y para el 2008 sólo el 4.8%, esta actividad tuvo un decremento de aproximadamente el 24%. Invariablemente un cambio importante y de gran impacto para el acuífero.

El principal cambio de uso de suelo que se ha generado es de agrícola por urbano y en la última década de agrícola por industrial. En el primer caso las zonas consideradas como de recarga natural (SSM) para el acuífero somero, han sido alteradas al ser ocupada por el uso de suelo urbano, trayendo como consecuencias la escasa o nula recarga del acuífero somero propiciando su agotamiento y una mayor extracción de agua subterránea del acuífero profundo para abastecimiento de la población.

De igual forma, áreas que eran tradicionalmente de vocación agrícola han sido ocupadas gradualmente por zonas urbanas.

Otras proyecciones con el modelo para 50 años muestran que el cono de abatimiento se desarrolla de manera general en todo el valle (Figura III.7). Debido a que la población y la actividad industrial seguirán en incremento y considerando este escenario, es prioritario buscar fuentes alternas de abastecimiento para los diferentes usos de la población.

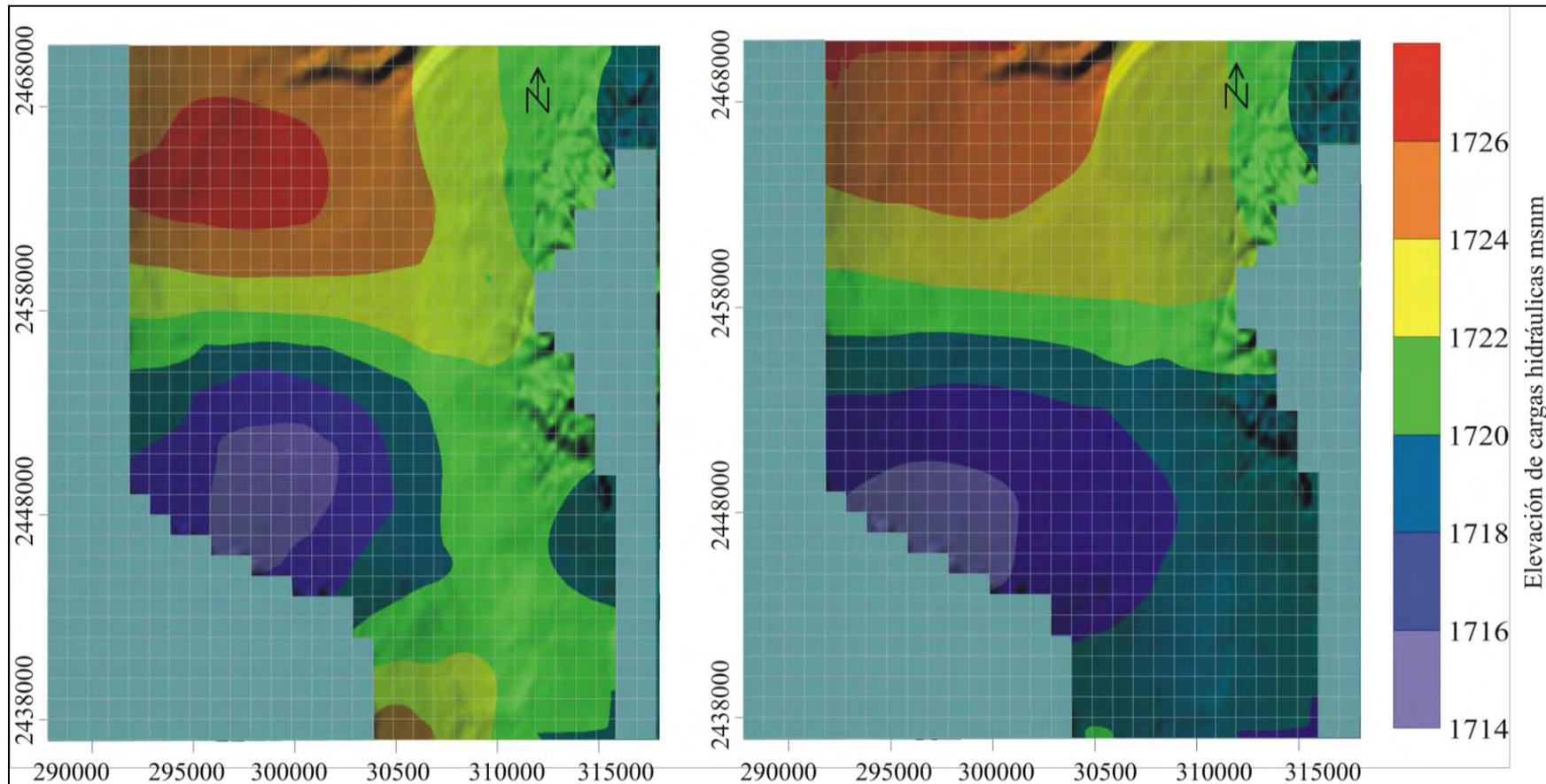


Figura III.8. Simulaciones predictivas. A. Considerando proyecciones de crecimiento poblacional y análisis de los cambios de uso de suelo y se alcanza el volumen fijado por la CONAGUA en 2021. B. Considerando un régimen de extracción constante de  $136 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}$  a 50 años.

Como resultado del modelo se cuantificó las recarga vertical, los aportes laterales en la capa 1 y 2 como se muestra en la Figura III:8.

Al realizar el balance de masa sobre las capas, se cuantificó los diferentes aportes en las fronteras. Los resultados muestran que la recarga vertical sobre el acuífero colgado es mínima ( $0.042 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ), lo cual es congruente con las evidencias geológicas, hidrogeoquímicas y de edad del agua, de la no conectividad hidráulica entre las unidades acuíferas.

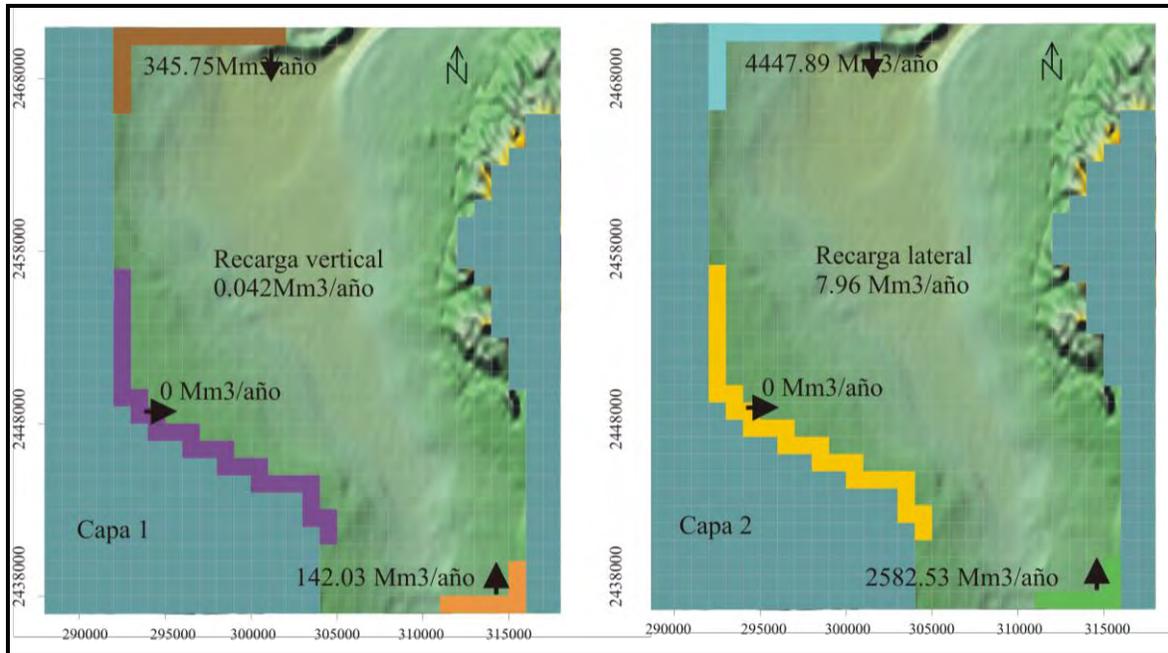


Figura III.9. Balance de masa del modelo de flujo en las capas 1 y 2.

El aporte lateral es el más importante para el sistema acuífero; del 100% del flujo que pasa por la frontera norte, el 7% entra a la capa 1 y el 93% a la capa 2, mientras que para la frontera sur el 5% entra a la capa 1 y el 95 a la capa 2.

Cabe resaltar que la frontera norte es quien proporciona el mayor volumen anual al sistema con  $4793.64 \text{ Mm}^3/\text{año}$ , en tanto que la sur sólo con  $2670.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ . Es decir por la frontera norte ingresa el doble de agua que en la frontera sur.

El análisis global muestra que la capa 2 (medio fracturado), es el acuífero más importante del sistema.

### III.5. Conclusiones

La modelación numérica fue una herramienta efectiva en la evaluación de los efectos de los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí

En los últimos 50 años se han dado cambios drásticos en el sistema acuífero. El cambio principal ha sido de agrícola por urbano e industrial.

Basado en los resultados del modelo se puede concluir que no existe una conexión hidráulica entre el acuífero colgado y el acuífero profundo.

Las simulaciones numéricas muestran que el mayor impacto del cambio de uso de suelo, ha sido el crecimiento del cono de abatimiento de la zona urbana (centro del valle) hacia la zona industrial (sur del valle).

A partir de las proyecciones realizadas de los datos de bombeo, se estableció que en el 2006, el uso de agua para la agricultura era de 19.8% y para el 2008 de 4.8%, representando un decremento del 24%. Para estos mismos años el uso del agua para la industria era de 7.7% y se incremento a 14% respectivamente, representando un incremento del 55%.

Con base en las proyecciones de crecimiento poblacional y análisis de los cambios de uso de suelo y la aplicación de modelo numérico se muestra que el volumen concesionado para el acuífero establecido por la CONAGUA (136 Mm<sup>3</sup>/año) se alcanzará en el 2021.

A partir del modelo de flujo se establece que la recarga vertical sobre el acuífero colgado es mínima (0.042 Mm<sup>3</sup>/año).

El aporte lateral es el más importante para el sistema acuífero, principalmente a través del flujo que pasa por la frontera norte (4793.64Mm<sup>3</sup>/año).

El análisis global muestra que la capa 2 (medio fracturado), es el acuífero más importante del sistema.

De continuarse este régimen de extracción, el cono de abatimiento seguirá desarrollándose en el valle, propiciando un descenso generalizado en los niveles de agua subterránea.

El modelo de flujo para el sistema acuífero del VSLP, muestra un claro efecto de riesgo de minado.

### III.6. Bibliografía

- Anderson, M. P. and Wang, H. F., 1982. Introduction to groundwater modeling, finite difference and finite elements methods. Academic Press, Inc. 237 p.
- Cardona-Benavides, A., 2007, Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: Reacciones, procesos y contaminación: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de Doctoral, 238 p.
- Cardona-Benavides, A., 1990, Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo: México, Universidad Autónoma de Nuevo León, Tesis de Maestría, 97p
- Carrillo-Rivera, J.J., Clark, I.D. y Fritz P., 1992, Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes: Applied Hydrogeology, 1(4), 35-48.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona-Benavides, A. y Edmunds, W. M. (2002), Use of regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí, basin, Mexico. Journal of Hydrogeology, 261, 24-47.
- Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2005, Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 "San Luis Potosí" en el Estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, reporte, 74 p.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1996-a. Estudio Hidrogeológico de la Contaminación del Agua Subterránea en la Zona Industrial de San Luis Potosí, S. L. P. 4 Volúmenes.
- Comisión Nacional del Agua (CNA), 1996-b. Actualización Geohidrológica del Valle de San Luis Potosí. Informe inédito, 6 pp. Anexo tablas y planos.
- Chávez-Rodríguez, A., Pinales-Munguía, A., Ducoing-Castillo, R. y Cruz-José, J. L., 2006. Modelación aplicada a sistemas acuíferos: enfoques y desarrollos en México. Comisión Estatal del Agua de Guanajuato, 563 p.
- Cruickshank, C., Shidawara, M. y Rosengaus, M., 1982. Modelo tridimensional de contaminantes de acuíferos en el Valle de México. Instituto de Ingeniería, UNAM. Elaborado para el Departamento del Distrito Federal.
- Difurt-Candelaria, A., Martínez-Ruiz, V. J. y Martínez, S., 1995. Calibración del Modelo Matemático del Acuífero Profundo del Valle de San Luis Potosí. Informe Técnico, Facultad de Ingeniería, UASLP.
- Herrera, I., Yates, R., y Hennart, J. P., 1982. Estudio del hundimiento y balance de los acuíferos subterráneos de la Ciudad de México. Instituto de Investigación de matemáticas aplicadas y sistemas, UNAM.
- Herrera, I., Martínez, R., y Hernández, G., 1989. Contribución para la administración científica del agua subterránea en la cuenca de México. Instituto de Geofísica, UNAM, Geofísica Internacional (28-2), pp.283-295.

- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 1981, Tabulados básicos, X Censo General de Población y Vivienda, 1980, (en cd): México Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 1991, Tabulado básicos, XI Censo General de Población y Vivienda, 1990, (en cd): México Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 2001, Tabulado básicos, XII Censo General de Población y Vivienda, 2000, (en cd): México Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 2007. Carta Topográfica F14-4, escala 1:250 000: San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. Impresa y digital.
- Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática (INEGI), 2010, II Conteo de Población y Vivienda 2010: México, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática.
- Kohn-Ledesma, I., 2009. Modelo de flujo del acuífero de San Luis Potosí, SLP. Universidad Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Posgrado en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría, 118 pp.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Aranda-Gómez, J.J., 1982, Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí: San Luis Potosí, México, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico 85, 208 pp.
- Martínez-Ruiz, V. J. y Aguirre, M. A., 1987. Geohidrología del área de San Bartolo de Berrios, Municipio de San Felipe Guanajuato. Cuenca de Villa de Reyes, S. L. P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico No. 108.
- Martínez-Ruiz, V. J. y Aguirre, M. A., 1984. Comportamiento del Nivel Estático de Acuífero Profundo de la Cuenca de San Luis Potosí, Hasta Junio de 1984. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto Técnico No. 96.
- Martínez-Ruiz, V. J., 1986. Condiciones Geohidrológicas Actuales del Valle de San Luis Potosí, Hasta Junio de 1984. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología y Metalurgia. Folleto Técnico No. 105.
- McDonald, M.G. and Harbaugh, A.W., 1988, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1, 586 p.
- Mahlknecht, J., Steinich, B., Navarro de León, I., 2004, Groundwater chemistry and mass transfers in the Independence aquifer, central Mexico, by using multivariate statistics and mass-balance models: *Environmental Geology*, 45(6), 781-795.
- Medina, F., 1974. Una Solución al Problema del Agua en San Luis Potosí, S.L.P. Folleto Técnico No. 41, Instituto de Geología y Metalurgia, UASLP
- Noyola-Medrano, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez L. F., López-Loera, H. y Carbajal N., 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24(2), p. 395-410.

- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), 1977, Estudio geohidrológico de evaluación y censo de los Estados de San Luis Potosí y Zacatecas, 1a. parte, Zona San Luis Potosí, Contrato EIGZA-77-16G.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), Comisión Nacional del Agua (CNA) y Universidad Autónoma de México (UNAM), 1992. Modelación Matemática del Acuífero de San Luis Potosí, para Definir Políticas de Explotación, para Abastecimiento de Agua a la Ciudad de San Luis Potosí. 74 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008, Boletín del Archivo Histórico del Agua. Año 13, No. 40, Septiembre- diciembre 2008, 89 p.
- Sheridan-Prieto, C., 2001, Indios madrineros Colonizadores tlaxcaltecas en el noroeste novohispano: Estudios de Historia Novohispana, 24, 24p.
- Organismo Intermunicipal metropolitano de agua potable, alcantarillado, saneamiento y servicios conexos de los municipios de Cerro de San Pedro, San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez (INTERAPAS), 2004. Reporte técnico, no publicado, 152 pp.
- Peña, F., 2006, Abasto de agua a la ciudad de San Luis Potosí, en Barkin, D. (ed.), La Gestión del Agua Urbana en México: México, Universidad de Guadalajara, 249-264.
- Ramos-Leal, J.A., Martínez-Ruiz, V.J., Castro-Rodríguez, A., 2005. Vulnerabilidad Acuifera e Índices de Calidad del Agua Subterránea de los Valles de San Luis Potosí-Villa de Reyes. Informe Interno (1er. Informe), Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, IPICYT, 35 pp.

## **RECOMENDACIONES**

## Recomendaciones

Como ya se menciona al inicio de este trabajo la UNESCO en 2006, reconoció la disponibilidad del agua potable como un derecho humano básico. Sin embargo, la disponibilidad está sujeta a condiciones tanto naturales como antropogénicas y son éstas últimas las que en mayor medida definen su distribución espacial y temporal.

*“..al agua, se le despoja de valor. El agua es un bien desechable y contaminable, accesible con sólo abrir una llave o accionar una bomba,....., se trata de darle valor mercantil, transformarla en una mercadería sometida a reglas irreales de un mundo financiero incoherente e injusto.*

*En los hechos, el verdadero valor del agua, está en su papel esencial para el desarrollo de la vida, en su insustituibilidad, en su carácter de irremplazable y único” (Antón y Díaz-Delgado, 2000)*

Ante la situación de baja disponibilidad del agua, es importante hacer un uso eficiente de ésta para asegurar su existencia a las generaciones futuras. En el contexto de los usos de suelo y en orden jerárquico por volumen de uso, se propone a continuación una serie de acciones que permitan eficiente el uso del agua en la zona de estudio.

## Uso de suelo urbano

En el uso de suelo urbano dentro del VSLP, el principal uso del agua es para consumo humano y también es en éste uso de suelo donde se reporta las principales pérdidas de agua.

La recomendación de acciones de uso eficiente comienza en los hogares, ya que con medidas sencillas, en su conjunto pueden llegar a representar un ahorro importante en el consumo del agua y por consiguiente en la economía familiar. Instala algunos de los dispositivos ahorradores de agua y modificando hábitos de consumo y uso encaminados al uso eficiente del agua, puede representar un ahorro de hasta 640 litros diarios en una familia promedio.

En lo que a la red de abastecimiento público se refiere, se ha estimado que entre un 30% y 50 % del agua se pierde en fugas debido a las deficiencias en la operación e infraestructura de la distribución del agua. CNA (2005) reconoció que se pierde en los sistemas de distribución cerca de 100 lts/habitante/día.

Por lo anterior, es imperante realizar acciones encaminadas a resolver la pérdida de agua por fugas. Una recomendación es la aplicación de la metodología presentada por Ochoa y Bourguett (1998) encaminada a manejar en forma integral cuatro grandes bloques de actividades para optimizar los recursos disponibles y reducir las pérdidas a niveles aceptables.

El primer bloque consiste en el *Diagnóstico de pérdidas* para evaluar los volúmenes de agua que se pierden y sus principales patrones de ocurrencia y poder identificar las causas que las producen.

El segundo bloque está dado por la *Sectorización de la red para facilitar la reducción de pérdidas* se evalúa y optimiza el funcionamiento hidráulico de la red de distribución.

El tercer bloque consiste en la *Eliminación de pérdidas* definiendo los procedimientos, diseños, equipos y modelos de decisión, para facilitar la búsqueda de pérdidas y subsanar el daño existente.

Finalmente, en el *Control de pérdidas* se plantean las acciones, ya sean directas, indirectas o de apoyo, que permitan establecer una estructura adecuada dentro de una empresa de agua para apoyar y dar la sustentabilidad a la reducción de pérdidas, de forma ordenada y con actividades objetivas.

### **Uso de suelo industrial**

En segundo uso del agua más importante en el VSLP es el industrial, el cual representa actualmente una demanda del 14%. El crecimiento de la actividad industrial ha representado modificaciones no solo en el uso de suelo y del agua sino también en la generación de agua residuales.

Las recomendaciones para el uso eficiente del agua en la industria pueden comenzar con acciones simples como las aplicadas en los hogares en los sanitarios, regaderas y servicio al personal.

Sin embargo, el principal ahorro se generaría mediante la aplicación de medidas de ahorro del agua en los procedimientos industriales. Algunas medidas pueden ser la instalación de sistemas de reutilización del agua en los procesos, incluyendo servicios sanitarios, enfriamiento y riego de jardines; instalación de medidores de consumo del agua en tus procesos; instala válvulas de seccionamiento y control para eliminar fugas; instalación de equipos de alta presión de agua que permitan la limpieza de equipos o maquinaria de forma efectiva y con gran ahorro del líquido, además de implementar programas adecuados de mantenimiento preventivo. Una acción por demás recomendable es la instalación de sistemas conjuntos de tratamiento y de reuso del agua en zonas industriales (CONAGUA).

### **Uso de suelo agrícola**

En la mayoría de los países no son las poblaciones quien demanda el mayor volumen de agua, es la agricultura. En México se usa aproximadamente 5.5 veces más que el abastecimiento público (CONAGUA, 2005). Esta situación no se cumple en el VSLP, pues el porcentaje de agua que se usa para la agricultura es

4.8% contra el 78% para consumo humano. No obstante, es importante establecer que las prácticas inadecuadas del uso del agua (riegos por inundación) y cultivos inapropiados (alta demanda de agua en zonas áridas) han dado lugar a una baja eficiencia en el uso del agua en la agricultura (máximo el 50%).

La propuesta para mejorar esta situación es efectuar la tecnificación de los sistemas de riego a través del riego por aspersión o por goteo, éste último resulta muy apropiado para zonas áridas. Con la tecnificación, los cultivos consumen hasta 70 por ciento menos agua que los que usan sistemas tradicionales.

Estudios de la SAGARPA detallan que el rendimiento de cultivos en superficie de riego se incrementa de 2.2 a 3.6 veces, en comparación con los que no cuentan con infraestructura hidroagrícola.

La tecnificación de la agricultura no solo beneficia en el ahorro del agua sino también en la productividad.

Las recomendaciones propuestas, si bien no representan una solución inmediata, si coadyuvan a la reducción de las demandas de agua para los distintos usos y en el largo plazo representarían la recuperación de los niveles del agua subterránea.

Cabe mencionar que todas estas acciones propuestas para el uso eficiente del agua para sus diferentes usos, reflejan el grado de cultura del agua que tiene una sociedad para llevarlas a cabo.

### **Bibliografía**

- Antón, D. y Díaz-Delgado, 2000. Sequía en un mundo de agua. Piriguazú ediciones y Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Comisión Estatal del Agua, 2005. Estadísticas del agua en México, edición 2005.
- Comisión Nacional del Agua, 2007. Recomendaciones para ahorrar agua. [http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/recomendaciones\\_para\\_ahorrar\\_agua.pdf](http://www.conagua.gob.mx/conagua07/noticias/recomendaciones_para_ahorrar_agua.pdf) Consultada el 18 de Junio de 2012.
- Ochoa A.L. y Bourguett O.V., 1998. Reducción Integral de Pérdidas de Agua Potable. Editado por el IMTA, Subcoordinación de Hidráulica Rural y Urbana.
- SAGARPA, 2012. Boletín de Prensa del 22 de Febrero del 2012. [www.sagarpa.gob.mx](http://www.sagarpa.gob.mx) › SAGARPA › Sala de Prensa › Boletines

## **CONCLUSIONES GENERALES**

## Conclusiones Generales

La alteración al sistema hidrogeológico original desde el inicio de las actividades antropogénicas en el VSLP ha constituido un factor de alto impacto en la actual calidad del agua subterránea.

En el Valle de San Luis Potosí, los cambios hidrológicos al sistema natural en la región ocurrieron de forma paulatina durante cuatro siglos a partir de la fundación de la ciudad; sin embargo, desde la segunda mitad del siglo veinte estos cambios se han acelerado de forma drástica.

En la actualidad los principales usos de suelo asociados a la actividad antropogénica en el valle son el uso urbano, el uso agrícola y el uso industrial. Además existen remanentes de cobertura vegetal.

Los usos de suelo de tipo antropogénico han sido los responsables de la contaminación del acuífero colgado con metales pesados, iones mayores, nitratos, grasas y aceites y contaminación bacteriológica.

Factores tales como geológicos, climáticos, socioeconómicos y cambios de uso de suelo afectan a la disponibilidad del agua en los hogares como lo muestra el Índice de Pobreza del Agua en el Valle de San Luis Potosí.

Debido a las condiciones naturales del área de estudio (zona semiárida, de muy baja precipitación, de escasas corrientes superficiales y de condiciones limitadas en la recarga del principal acuífero) el recurso hídrico es escaso, aunado a un manejo inadecuado del recurso, han llevado a éste a una condición de minado.

Basados en el análisis del Índice de Pobreza del Agua en el Valle de San Luis Potosí, fue posible detectar deficiencias tanto en el uso como en el manejo del recurso.

Índice de Pobreza del Agua en el Valle de San Luis Potosí fue de 46 puntos, el cual es similar o comparable con los índices reportados para países considerados en pobreza extrema en el mundo.

La modelación numérica permitió reproducir la dinámica del sistema acuífero y mediante la aplicación de distintas tasas de bombeo asociadas al uso de suelo realizar simulaciones que permitieran generar escenarios.

La identificación de fuentes potenciales de contaminación en este trabajo será una base para nuevas investigaciones y proponer escenarios de remediación y manejo de contaminantes.

El índice se ha aplicado muy poco en el país y en San Luis Potosí, no existen reportes de éste, por lo que representa un aporte importante en la evaluación del manejo y gestión del recurso hídrico.

## CONCLUSIONES GENERALES

Con éste tipo de herramienta, fue posible corroborar que la recarga vertical sobre el acuífero colgado es mínima ( $0.043 \text{ Mm}^3/\text{año}$ ).

El principal aporte es a través de los aportes laterales y principalmente de la parte norte sobre la capa 2 que representa al acuífero profundo.

La modelación numérica de flujos subterráneos ha representado una herramienta eficiente en la evaluación de los impactos generados por la extracción intensiva debido a los cambios de uso de suelo.

## **ANEXOS**

Anexo A. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí.

Punto	X	Y	pH	Eh (mV)	Na <sup>+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)	Ca <sup>+2</sup> (ppm)	Mg <sup>+2</sup> (ppm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)
1	306326	2451142	6.7	63	89	40.2	215	25.2	25.00
2	305775	2451778	6.5	56	64	39.4	217	26.9	37.00
3	306017	2452049	6.7	226	58	40.9	207	24.2	2.00
4	305308	2452724	6.3	62	102	35.2	299	29.2	8.00
5	306154	2453563	6.5	0.68	81	31.7	247	19.3	7.00
6	305982	2453724	6.5	53	83	27.4	177	15.2	10.00
7	306481	2453867	7.1	98	140	21	136	6.2	5.00
8	305348	2453467	6.6	134	78	37.1	209	25.5	7.00
9	307305	2448872	6.9	0.58	126	22.6	89	6.2	4.00
10	305791	2443680	6.2	130	115	17.4	66	8	9.00
11	305957	2443942	6.1	138	191	37.1	153	17.5	24.00
12	306134	2444605	6.8	100	38	17.4	110	10.7	6.00
13	305642	2444615	6.7	5.17	81	28.7	91	11.8	8.00
14	305450	2444826	5.7	177	237	83.3	405	59.8	54.00
15	301791	2457014	6.4	100	122	32.7	197	28.9	58.00
16	302758	2460264	6.2	148	24	22.8	90	9.4	6.00
17	306303	2459562	6.2	212	38	26.4	89	8.6	23.00
18	307442	2458220	6.5	191	61	29.8	135	15.9	27.00
19	305507	2456042	6.1	156	45	29.9	189	18.6	16.00
20	303754	2457371	6.4	161	53	31.8	255	24.2	52.00
21	300041	2457828	6.4	147	61	22	175	15.3	23.00
22	298584	2454733	6.4	158	81	46.6	134	21.8	24.00
23	298654	2457394	6.6	326	43	38.3	165	16	6.00
24	300910	2452763	6.8	259	95	22.3	75	8.2	12.00
25	301150	2452968	6.7	241	174	40.2	130	18.8	32.00
26	299511	2452943	6.8	342	200	91	210	29.8	45.00
27	299108	2453004	6.4	328	165	70.9	205	28.8	34.00
28	296606	2453527	6.7	334	64	85.8	167	19.4	14.00
29	292058	2450938	7.3	44	81	39.7	175	33.8	12.00
30	296662	2450956	6.4	324	58	54.6	92	11.3	22.00
31	296359	2450370	6.5	3.15	116	64.1	144	18.8	34.00
32	294603	2450837	6.4	346	79	48.3	142	22.9	10.00
33	295218	2453336	6.8	275	75	64.8	73	8.6	13.00
34	293326	2455218	6.5	283	68	15.4	68	5.6	10.00
35	293959	2452014	6.6	28.6	66	46	71	13.1	31.00
36	291145	2454412	6.1	290	36	25.4	54	12.2	18.00
37	295658	2455196	6.8	134	153	30.7	57	8.1	12.00
38	287239	2452508	6.1	296	39	45.5	76	15	10.00
39	289442	2454311	6.2	297	88	35.4	90	11.8	26.00
40	295454	2446242	5.1	344	34	10.9	14	2.7	9.00
41	296709	2447189	6.1	293	36	25.8	55	11.5	13.00
42	297933	2445273	6	299	39	29.1	85	24.1	6.00
43	299953	2444649	5.5	265	19	10.8	21	3.9	4.00
44	303907	2432230	6.3	45	21	5.9	9	1.2	9.00
45	304071	2434080	6.6	73	51	31	57	12.5	30.00
46	302770	2438427	5.9	115	21	15.8	20	2.9	4.00
47	303005	2441654	5.7	140	29	18.4	26	4.4	15.00

Briseida López Álvarez

Anexo A. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí (continuación).

Punto	X	Y	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (ppm)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	CE (μS/cm)	CT (UFC)	GA (ppm)	F <sup>-</sup> (ppb)
1	306326	2451142	276.00	270	126.00	126000.00	13.08	42.93	0.40
2	305775	2451778	190.00	279	132.00	132000.00	20.61	17.07	0.66
3	306017	2452049	40.00	510	114.40	114400.00	9.17	59.58	0.54
4	305308	2452724	120.00	474	212.80	212800.00	2.72	87.75	0.58
5	306154	2453563	60.00	435	131.20	131200.00	11.99	10.05	0.64
6	305982	2453724	56.00	405	94.05	94050.00	2.23	4.92	0.24
7	306481	2453867	52.00	315	134.00	134000.00	6.53	83.38	0.10
8	305348	2453467	145.00	276	134.40	134400.00	4.49	166.18	0.07
9	307305	2448872	52.00	345	73.20	73200.00	33.96	89.95	0.87
10	305791	2443680	115.00	186	46.40	46400.00	2.42	285.65	0.83
11	305957	2443942	240.00	225	160.00	160000.00	3.56	406.81	0.60
12	306134	2444605	80.00	111	78.00	78000.00	10.81	3.98	0.60
13	305642	2444615	140.00	135	72.00	72000.00	3.36	46.39	0.66
14	305450	2444826	250.00	36	152.80	152800.00	3.96	13.72	1.00
15	301791	2457014	116.00	255	130.00	130000.00	3.24	53.40	0.10
16	302758	2460264	60.00	210	38.00	38000.00	1.67	70.05	0.17
17	306303	2459562	92.00	120	44.00	44000.00	1.39	202.51	0.08
18	307442	2458220	56.00	330	77.60	77600.00	5.29	94.35	0.10
19	305507	2456042	196.00	225	100.00	100000.00	1.77	74.55	0.19
20	303754	2457371	84.00	300	196.00	196000.00	13.79	68.80	0.01
21	300041	2457828	76.00	330	104.00	104000.00	24.03	207.75	0.11
22	298584	2454733	96.00	285	91.00	91000.00	16.71	1.36	0.67
23	298654	2457394	14.00	450	70.00	70000.00	2.63	416.23	0.50
24	300910	2452763	46.00	225	64.00	64000.00	1.75	5.24	0.63
25	301150	2452968	114.00	360	120.00	120000.00	2.49	5.03	0.35
26	299511	2452943	196.00	411	164.00	164000.00	20.49	80.73	0.52
27	299108	2453004	204.00	381	218.00	218000.00	3.78	22.72	0.44
28	296606	2453527	200.00	345	65.00	65000.00	4.91	30.26	0.61
29	292058	2450938	194.00	513	52.00	52000.00	25.88	78.74	0.35
30	296662	2450956	50.00	243	76.00	76000.00	2.16	88.59	0.40
31	296359	2450370	108.00	291	117.60	117600.00	80.95	7.33	0.29
32	294603	2450837	138.00	300	89.60	89600.00	26.24	8.90	0.32
33	295218	2453336	44.00	270	67.20	67200.00	18.48	4.40	0.57
34	293326	2455218	56.00	210	54.00	54000.00	1.68	10.37	0.30
35	293959	2452014	94.00	240	52.00	52000.00	1.96	70.68	0.48
36	291145	2454412	110.00	120	18.40	18400.00	16.67	3.77	0.38
37	295658	2455196	126.00	270	64.00	64000.00	27.85	423.98	0.52
38	287239	2452508	176.00	120	43.20	43200.00	24.32	2.83	0.33
39	289442	2454311	146.00	138	104.00	104000.00	12.15	135.18	0.35
40	295454	2446242	88.00	30	10.40	10400.00	6.52	57.17	0.01
41	296709	2447189	144.00	120	21.60	21600.00	8.12	13.93	0.19
42	297933	2445273	212.00	102	28.80	28800.00	12.86	2.51	0.17
43	299953	2444649	52.00	40	10.80	10800.00	11.54	40.84	0.03
44	303907	2432230	20.00	40	8.40	8400.00	7.09	109.63	0.01
45	304071	2434080	90.00	60	72.80	72800.00	12.13	29.21	0.20
46	302770	2438427	48.00	60	10.40	10400.00	13.79	60.10	0.01
47	303005	2441654	60.00	40	16.40	16400.00	10.90	165.45	0.01

Briseida López Álvarez

Anexo A. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí (continuación).

Punto	X	Y	Hg (ppb)	Ba (ppb)	Sr (ppb)	Cd (ppb)	Pb (ppb)	Ag (ppb)	Rb (ppb)
1	306326	2451142	1.28	52.16	1126.66	0.82	2.64	0.13	106.63
2	305775	2451778	0.62	144.18	1419.26	0.55	2.86	< 0.1	98.75
3	306017	2452049	0.27	236.61	1241.37	0.29	0.54	< 0.1	109.02
4	305308	2452724	1.04	109.72	1576.74	2.51	1.91	0.19	104.13
5	306154	2453563	1.18	178.04	1111.10	0.22	1.20	3.07	85.48
6	305982	2453724	1.61	208.62	904.44	0.35	0.47	1.74	79.45
7	306481	2453867	0.41	75.26	391.95	0.13	0.72	< 0.1	37.08
8	305348	2453467	0.83	68.25	1403.70	0.59	1.00	< 0.1	103.93
9	307305	2448872	0.42	15.49	161.27	5.86	21.86	< 0.1	41.52
10	305791	2443680	0.52	82.14	314.76	0.87	3.13	< 0.1	59.43
11	305957	2443942	0.33	69.59	614.66	0.27	0.51	< 0.1	105.05
12	306134	2444605	0.38	52.39	429.47	0.43	2.18	< 0.1	43.91
13	305642	2444615	0.34	114.80	449.40	1.88	1.69	< 0.1	81.98
14	305450	2444826	0.14	73.93	1010.01	3.97	8.03	< 0.1	139.15
15	301791	2457014	1.17	147.12	983.76	1.34	2.38	0.24	99.25
16	302758	2460264	0.56	167.09	451.25	1.45	0.79	< 0.1	66.50
17	306303	2459562	0.93	81.47	492.27	2.71	2.85	0.44	71.18
18	307442	2458220	0.43	161.01	834.45	0.25	0.96	0.28	71.43
19	305507	2456042	1.40	60.96	978.90	0.44	0.77	< 0.1	83.95
20	303754	2457371	1.57	122.21	1167.49	1.04	2.09	1.43	98.86
21	300041	2457828	0.75	275.74	975.01	0.21	0.49	0.10	64.24
22	298584	2454733	0.49	48.90	660.54	0.84	1.45	< 0.1	165.76
23	298654	2457394	0.40	297.31	1140.27	0.23	0.60	< 0.1	72.52
24	300910	2452763	0.36	53.85	370.37	0.21	0.77	< 0.1	59.80
25	301150	2452968	0.51	50.46	768.64	0.31	0.44	0.10	95.05
26	299511	2452943	0.37	116.53	1293.86	3.22	3.01	< 0.1	288.11
27	299108	2453004	0.44	62.40	1164.57	0.27	0.51	< 0.1	185.67
28	296606	2453527	0.52	92.09	856.90	0.96	1.10	< 0.1	203.81
29	292058	2450938	< 0.1	136.63	1165.54	0.27	1.25	< 0.1	101.96
30	296662	2450956	0.27	88.89	443.47	3.84	1.38	0.30	148.98
31	296359	2450370	2.27	114.40	792.35	3.13	0.78	0.62	167.29
32	294603	2450837	0.89	115.00	723.14	0.90	1.48	< 0.1	167.48
33	295218	2453336	0.57	72.86	447.55	1.72	0.49	0.81	105.22
34	293326	2455218	0.43	72.46	317.58	0.81	1.64	0.17	42.45
35	293959	2452014	1.68	76.40	498.68	2.44	0.96	1.13	91.99
36	291145	2454412	0.75	96.03	327.50	0.27	0.40	0.34	78.22
37	295658	2455196	0.96	37.44	383.78	0.47	1.26	0.13	64.42
38	287239	2452508	0.85	87.62	405.36	0.32	1.17	0.23	90.12
39	289442	2454311	1.14	56.04	431.42	1.34	1.79	0.83	71.98
40	295454	2446242	0.47	33.00	78.61	0.46	1.60	0.43	24.36
41	296709	2447189	0.70	88.35	294.54	0.56	1.15	< 0.1	54.49
42	297933	2445273	0.23	50.85	508.21	1.63	0.69	< 0.1	61.20
43	299953	2444649	0.47	73.46	133.86	0.27	0.48	< 0.1	23.99
44	303907	2432230	0.13	7.99	30.71	0.56	2.40	< 0.1	32.23
45	304071	2434080	0.29	111.12	303.97	1.98	27.90	< 0.1	47.46
46	302770	2438427	0.39	40.58	94.77	2.34	6.65	0.11	31.01
47	303005	2441654	0.69	80.67	139.50	0.86	5.62	0.29	33.08

Briseida López Álvarez

Anexo A. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí (continuación).

Punto	X	Y	Co (ppb)	Cu (ppb)	Fe (ppb)	As (ppb)	Li (ppb)	Ni (ppb)	Mn (ppb)
1	306326	2451142	0.16	0.24	33.37	12.60	6.53	7.55	1.16
2	305775	2451778	0.25	2.73	39.23	20.21	4.18	4.20	2.81
3	306017	2452049	0.37	< 0.1	52.86	10.45	5.18	3.42	800.54
4	305308	2452724	0.36	0.25	46.06	10.25	4.59	5.07	0.99
5	306154	2453563	0.26	1.14	29.60	10.41	3.89	3.02	26.30
6	305982	2453724	0.19	< 0.1	22.12	7.77	3.88	2.47	2.68
7	306481	2453867	0.47	0.72	21.16	7.50	10.50	2.08	0.68
8	305348	2453467	0.36	1.00	29.97	8.04	5.48	3.40	43.97
9	307305	2448872	0.43	62.67	77.12	9.84	90.36	15.45	179.61
10	305791	2443680	0.36	4.33	36.47	11.87	9.13	12.08	7.53
11	305957	2443942	4.84	0.10	25.43	9.89	14.88	5.95	3.78
12	306134	2444605	0.27	1.78	31.25	63.72	6.18	2.86	86.65
13	305642	2444615	0.52	0.74	20.55	4.78	4.44	24.70	2.43
14	305450	2444826	1.52	< 0.1	< 0.1	13.71	19.98	517.82	1529.97
15	301791	2457014	0.27	0.35	95.08	4.54	5.16	3.92	2.59
16	302758	2460264	< 0.1	< 0.1	21.26	4.32	3.99	1.29	1.18
17	306303	2459562	0.10	0.55	24.66	7.57	4.31	1.61	1.19
18	307442	2458220	0.20	0.68	26.33	7.85	5.75	2.61	4.33
19	305507	2456042	0.15	< 0.1	21.50	5.55	4.74	2.31	1.80
20	303754	2457371	0.47	1.33	29.77	7.09	3.08	4.38	1.49
21	300041	2457828	0.28	0.29	26.45	5.05	4.25	3.41	3.31
22	298584	2454733	0.21	0.86	26.50	5.25	5.47	2.22	0.99
23	298654	2457394	0.63	< 0.1	29.80	13.44	4.31	4.25	21.03
24	300910	2452763	0.10	221.80	19.56	11.62	3.60	1.68	0.60
25	301150	2452968	0.17	< 0.1	18.35	5.60	4.43	1.95	0.89
26	299511	2452943	2.90	2.47	40.57	48.93	30.95	9.46	970.38
27	299108	2453004	0.30	< 0.1	24.55	64.09	6.19	2.69	9.84
28	296606	2453527	0.21	< 0.1	25.91	40.07	5.36	2.81	2.13
29	292058	2450938	0.27	< 0.1	29.93	10.86	6.91	4.24	1859.66
30	296662	2450956	2.52	0.05	32.64	44.64	3.41	3.70	1.48
31	296359	2450370	0.23	1.45	27.00	11.04	7.87	2.44	1.13
32	294603	2450837	0.32	0.49	26.61	2.40	2.32	3.11	9.97
33	295218	2453336	0.22	< 0.1	24.30	22.46	5.42	2.34	0.59
34	293326	2455218	0.09	2.58	33.36	10.45	5.07	1.27	1.12
35	293959	2452014	0.11	< 0.1	24.48	9.34	2.53	1.30	0.62
36	291145	2454412	< 0.1	< 0.1	21.66	2.51	10.59	1.00	0.91
37	295658	2455196	0.10	0.25	119.87	17.92	4.90	1.53	20.70
38	287239	2452508	< 0.1	0.29	20.78	74.10	3.21	1.35	4.33
39	289442	2454311	0.23	0.71	22.72	18.89	5.14	1.94	0.87
40	295454	2446242	0.13	0.17	15.29	12.29	9.33	1.22	5.93
41	296709	2447189	0.14	3.85	46.07	6.83	4.36	1.63	24.04
42	297933	2445273	0.11	< 0.1	13.39	5.71	11.67	2.07	16.68
43	299953	2444649	0.10	< 0.1	17.27	4.29	7.81	1.04	5.97
44	303907	2432230	< 0.1	0.83	25.15	11.95	6.70	0.50	4.45
45	304071	2434080	0.14	10.85	13.10	12.91	8.55	2.19	4.39
46	302770	2438427	0.10	3.05	143.30	9.53	10.16	1.46	4.05
47	303005	2441654	0.11	2.60	73.33	5.45	9.45	1.47	3.62

Briseida López Álvarez

## Anexo A. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí (continuación).

Punto	X	Y	Cr (ppb)	Zn (ppb)	Al (ppb)
1	306326	2451142	0.59	3.34	< 0.1
2	305775	2451778	0.50	11.81	0.96
3	306017	2452049	0.39	2.84	< 0.1
4	305308	2452724	0.55	18.71	2.46
5	306154	2453563	0.29	4.42	< 0.1
6	305982	2453724	0.40	2.71	< 0.1
7	306481	2453867	0.19	3.93	< 0.1
8	305348	2453467	0.35	29.73	< 0.1
9	307305	2448872	1.23	301.90	27.97
10	305791	2443680	0.60	19.51	54.53
11	305957	2443942	0.41	4.26	< 0.1
12	306134	2444605	0.14	35.95	3.19
13	305642	2444615	161.91	14.43	8.38
14	305450	2444826	2.97	10.61	3456.42
15	301791	2457014	0.29	24.33	3.28
16	302758	2460264	0.37	2.32	< 0.1
17	306303	2459562	0.49	8.50	7.30
18	307442	2458220	0.23	5.22	2.09
19	305507	2456042	0.12	2.99	< 0.1
20	303754	2457371	0.57	187.66	< 0.1
21	300041	2457828	0.14	3.25	< 0.1
22	298584	2454733	0.29	8.05	55.89
23	298654	2457394	0.20	5.15	34.10
24	300910	2452763	0.33	8.67	6.13
25	301150	2452968	0.18	2.25	< 0.1
26	299511	2452943	1.40	15.43	8.36
27	299108	2453004	22.53	1.09	< 0.1
28	296606	2453527	0.31	4.61	< 0.1
29	292058	2450938	0.63	2.51	3.53
30	296662	2450956	0.45	3.90	14.37
31	296359	2450370	0.49	4.88	< 0.1
32	294603	2450837	0.16	4.55	< 0.1
33	295218	2453336	6.52	7.33	< 0.1
34	293326	2455218	0.35	15.44	1.25
35	293959	2452014	0.97	4.54	0.63
36	291145	2454412	0.10	10.29	< 0.1
37	295658	2455196	0.20	3.00	3.28
38	287239	2452508	0.16	34.91	1.12
39	289442	2454311	0.24	10.10	10.37
40	295454	2446242	< 0.1	4.18	9.18
41	296709	2447189	0.13	4.38	< 0.1
42	297933	2445273	0.20	5.77	< 0.1
43	299953	2444649	< 0.1	3.13	< 0.1
44	303907	2432230	0.33	5.69	13.75
45	304071	2434080	0.36	38.17	18.22
46	302770	2438427	0.53	15.20	540.97
47	303005	2441654	0.36	11.28	218.47

Briseida López Álvarez

## **Anexo B. Teoría de flujo subterráneo**

En un sistema acuífero, que ha sufrido cambios en la calidad del agua no es fácil de reparar. En situación opuesta a las aguas superficiales, las aguas subterráneas se desplazan muy lentamente, por lo que los tiempos de residencia de contaminantes llegan a ser del orden de cientos de años, pasando desapercibida por mucho tiempo y provocar grandes daños en la calidad del agua subterránea.

Un modelo que represente el transporte de contaminantes típico del régimen del agua subterránea es una herramienta de gran importancia para la comprensión y solución del fenómeno planteado.

### **Tipos de modelos**

Se denomina modelo a la representación matemática o gráfica de la realidad utilizada para plantear un problema, normalmente de manera simplificada (Reyes-Gutiérrez, 1998). Existen modelos físicos, matemáticos, numéricos, analógicos y conceptuales.

Los modelos de simulación numérica son el apoyo principal en el análisis de acuíferos, ya que resuelven las ecuaciones que se consideran para representar los procesos gobernantes del flujo de agua subterránea y transporte de solutos en medio poroso.

Los modelos de flujo del agua subterránea se basan en dos leyes: la Ley de Darcy y la Ley de la Conservación de la Masa.

### **Ley de Darcy**

La ley de Darcy establece que el agua fluye de los niveles de mayor energía a los niveles de menor energía (Zheng y Bennett, 2002). El estado de energía del sistema se representa por la variable  $h(x, y, z)$ , carga hidráulica. La carga hidráulica es función de la presión y de la energía potencial por unidad de peso del fluido. En los sistemas de flujo subterráneo la energía cinética se desprecia.

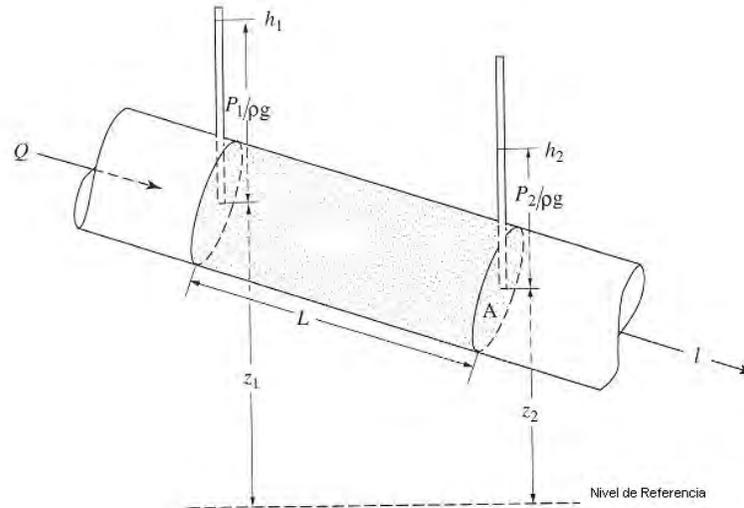


Figura A.1. Esquema que representa la define la Ley de Darcy.

La carga  $h$  mide la energía potencial de una unidad de peso de agua localizada en un punto de medición. En una sección, la pérdida de carga entre dos puntos representa la energía o trabajo requerido para mover una unidad de peso de agua entre estos puntos. Note que la carga, en un punto dentro de la sección tiene dos componentes:

$$h = z + \frac{P}{\rho g} \quad (\text{Ec. A.1})$$

donde  $z$  es la elevación del punto sobre el nivel de referencia,  $P$  es la presión,  $\rho$  es la densidad de masa del agua,  $g$  es la aceleración de la gravedad.

La ley de Darcy es una ley empírica y establece que el flujo de masa de agua es proporcional a la fuerza impulsora. Con referencia a la figura 6 se tiene:

$$\frac{Q}{A} = -K \frac{h_2 - h_1}{L} \quad (\text{Ec. A.2})$$

donde  $Q$  es el caudal con dimensiones de volumen por unidad de tiempo,  $A$  es el área transversal del cilindro,  $K$  es la conductibilidad hidráulica,  $h_1$  es la carga en el extremo superior y  $h_2$  es la carga en el extremo inferior. El signo negativo indica que el flujo de agua se establece de la carga mayor a la carga menor.

Expresada en términos de derivación, la ley de Darcy puede ser escrita como:

$$Q = -KA \frac{dh}{dl} \quad (\text{Ec. A.3})$$

donde  $l$  representa la distancia a través del tubo y  $dh/dl$  es el gradiente hidráulico.

El término  $Q/A$  se conoce como descarga específica o velocidad Darciana,  $v$ ; y en el caso más general es un vector que representa el caudal por unidad de área perpendicular a la dirección del flujo. En un problema tridimensional la velocidad Darciana es expresada como un vector a través de la relación:

$$q = q_x i + q_y j + q_z k \quad (\text{Ec. A.4})$$

Donde  $q$  es el vector de la velocidad Darciana;  $i, j$  y  $k$  son la unidad convencional de vectores en dirección al sistema de coordenadas  $x, y$  y  $z$  respectivamente;  $q_x, q_y$  y  $q_z$  son los componentes escalares de la velocidad Darciana en esas direcciones. Si la porosidad es caracterizada en tres ejes principales de conductividad hidráulica, y si esos ejes principales son alineados con los ejes coordenados, los componentes de la velocidad Darciana en el agua con densidad y viscosidad uniforme está dados por:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{Ec. A.5})$$

donde  $K_x, K_y$  y  $K_z$  representan las componentes de la conductividad hidráulica en el sistema coordenado respectivamente. En términos de carga hidráulica la ecuación (Ec. A.5), puede ser escrita como:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{xy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{xz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ q_y &= -K_{yx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{yz} \frac{\partial h}{\partial z} \\ q_z &= -K_{zx} \frac{\partial h}{\partial x} - K_{zy} \frac{\partial h}{\partial y} - K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (\text{Ec. A.6})$$

en forma matricial:

$$q \begin{pmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} -\partial h / \partial x \\ -\partial h / \partial y \\ -\partial h / \partial z \end{pmatrix} \quad (\text{Ec. A.7})$$

La matriz es simétrica debido a que  $K_{xy} = K_{yx}, K_{xz} = K_{zx}$  y  $K_{yz} = K_{zy}$ . Existe un conjunto de coordenadas en que los términos fuera de la diagonal principal se vuelven cero. A éstas coordenadas se les llama *coordenadas principales*, y en la práctica las coordenadas  $x, y, z$  se orientan a lo largo de las coordenadas principales.

### 1.1. Ecuación general del balance de masa

El transporte de los contaminantes es interpretado a partir de la teoría de la Dispersión Hidrodinámica.

El agua subterránea se encuentra en movimiento constante (advección), las partículas de soluto son transportadas por la masa hídrica en movimiento a lo largo de la dirección de flujo, con velocidad igual a la efectiva del agua (Zheng y Bennett, 2002).

El desarrollo de la ecuación de transporte advectivo se realiza mediante una ecuación del balance de masa. La masa del soluto transportado es dado por:

$$Q_m = QC \quad (\text{Ec. A.8})$$

donde  $Q_m$  es la masa del soluto que cruza en un plano por unidad de tiempo y  $Q$  es el volumen de fluido descargado (volumen por unidad de tiempo). Usando el vector de la velocidad Darciana,  $q$ , un vector de flujo de masa advectivo puede ser calculado como:

$$q_m = qC \quad (\text{Ec. A.9})$$

donde  $q_m$  es un vector que tiene la dirección de la velocidad Darciana y magnitud igual a la masa del soluto transportado advectivamente por unidad de tiempo a través de un área normal del flujo.

La figura 7 muestra dos planos de sección transversal, normales al flujo y separados por una distancia  $\Delta l$  ambos planos encierran una sección de volumen  $A\Delta l$ , donde  $A$  es nuevamente el área de la sección transversal del tubo. Se designa una concentración  $C_1$  en la sección del extremo superior transversal y  $C_2$  la sección del el extremo inferior. Una cantidad de volumen de masa de soluto entra  $A\Delta l$  por la cara del extremo superior,  $Q_{m1}$  y luego igual a  $QC_1$ , la cantidad que está saliendo de este volumen en la cara del extremo inferior,  $Q_{m2}$ , está dada por  $QC_2$ . La masa del soluto dentro del volumen  $A\Delta l$ , puede cambiar con el tiempo. Ahora bien,  $M$  representa la masa del soluto en el volumen  $A\Delta l$ , y  $\partial M / \partial t$  el rango al cual la masa cambia con el tiempo se obtiene:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = QC_1 - QC_2 = qA(C_1 - C_2) \quad (\text{Ec. A.10})$$

donde  $q$  es la magnitud escalar de la velocidad Darciana.

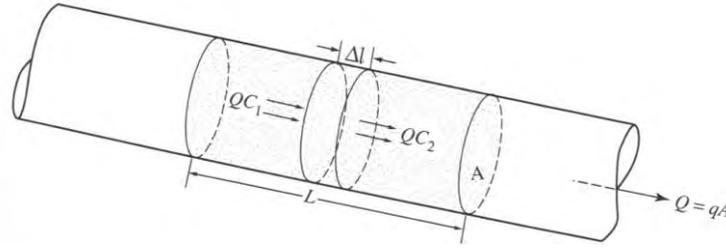


Figura A.2. Tubo donde se muestra el transporte de masa dentro y fuera de un volumen elemental.

El rango al cual la masa del soluto cambia con el tiempo puede ser expresado en términos de la cantidad a la cual la concentración cambia con el tiempo:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \theta A \Delta l \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.11})$$

de las ecuaciones A.10 y A.11 tenemos:

$$qA(C_1 - C_2) = \theta A \Delta l \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.12})$$

La diferencia de concentración  $(C_1 - C_2)$  puede ser expresada en términos de gradiente de concentración a lo largo del tubo,  $\partial C / \partial l$ , como:

$$(C_1 - C_2) = -\frac{\partial C}{\partial l} \Delta l \quad (\text{Ec. A.13})$$

donde  $l$  es considerado positivo en dirección del flujo. Combinando las Ecuaciones A.12 y A.13 arroja:

$$-qA \frac{\partial C}{\partial l} \Delta l = \theta A \Delta l \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.14})$$

o

$$-q \frac{\partial C}{\partial l} = \theta \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.15})$$

La Ecuación A.15 puede ser generalizada como:

$$-\frac{\partial (qC)}{\partial l} = \theta \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.16})$$

donde el cambio en el producto  $(qC)$  entre las caras del volumen elemental es ahora reconocido el factor controlador de acumulación de soluto.

Al desarrollar el balance de masa de soluto en un volumen elemental fijo espacial:

$$-\frac{\partial}{\partial x} (q_x C) - \frac{\partial}{\partial y} (q_y C) - \frac{\partial}{\partial z} (q_z C) + q_s C_s = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.17})$$

donde  $q_s$  es la cantidad de flujo volumétrico por unidad de volumen y  $C_s$  representa la concentración del soluto en el agua.

## 1.2. Flujo saturado en condiciones de estado establecido

Una de las derivaciones de la ecuación de flujo del agua subterránea es la que representa al flujo saturado en condiciones de estado estacionario.

Consideremos un volumen unitario de medio poroso como el que se muestra en la figura 8. A éste elemento se le conoce como Volumen Elemental de Control (VEC).

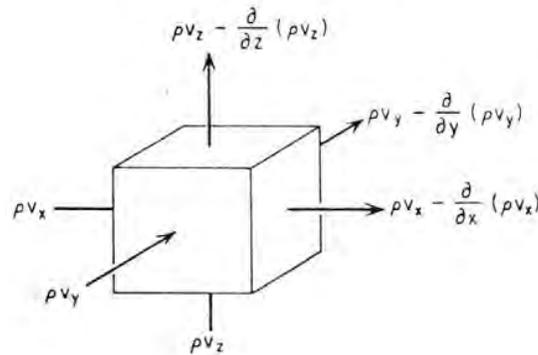


Figura A.3. Volumen Elemental de Control (VEC) para flujo en medio poroso.

La Ley de conservación de masa en estado estacionario a través de un medio poroso saturado marca que la rapidez de flujo de masa del fluido que entra en cualquier VEC sea igual a la rapidez del flujo de masa que sale de éste volumen. La ecuación matemática que representa lo anterior es la Ecuación de continuidad (Freeze y Cherry, 1979), y establece:

$$-\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. A.18})$$

donde  $\rho$  es la densidad del flujo y  $q_x, q_y$  y  $q_z$ , es la descarga específica en las direcciones  $x, y, z$ , respectivamente.

Si el fluido es incompresible  $\rho$ , es constante y se puede eliminar en cada término de la Ecuación A.18, y la ecuación se simplifica como:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} - \frac{\partial q_y}{\partial y} - \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (\text{Ec. A.19})$$

Sustituyendo en esta expresión las descargas  $q_x, q_y$  y  $q_z$  de acuerdo con la Ley de Darcy, se obtiene la ecuación de flujo en estado estacionario a través de un medio poroso anisótropo y saturado:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (\text{Ec. A.20})$$

En un medio isótropo,  $K_x = K_y = K_z = K$ , y si el medio es también homogéneo, entonces  $K(x, y, z)$  es constante. La ecuación 10 se reduce entonces a la ecuación de flujo en estado estacionario a través de un medio poroso en un medio isótropo y homogéneo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (\text{Ec. A.21})$$

La ecuación anterior también es conocida como Ecuación de Laplace. La solución de esta ecuación es una función de  $h(x, y, z)$  que describe el valor de la carga hidráulica  $h$  en todo punto de un campo de flujo tridimensional.

### 1.3. Flujo saturado en condiciones de estado transitorio

La Ley de la conservación de la masa para el flujo en estado transitorio en un medio poroso saturado marca que la rapidez neta de flujo de masa de fluido hacia el VEC sea igual a la rapidez de cambio en el almacenamiento de masa del fluido dentro del elemento (Zheng y Bennett, 2002). Con referencia a la figura 8, la ecuación de continuidad toma la forma:

$$-\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial z} = \rho S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.22})$$

donde  $S_s$  es el almacenamiento específico del medio saturado, que se define como el volumen de agua que un volumen unitario medio poroso, libera de su almacenamiento al producirse una caída unitaria en la carga hidráulica.

Expandiendo los términos del miembro izquierdo de la Ecuación A.22 por la regla de la cadena, y reconociendo que los términos de la forma  $\rho \partial q_x / \partial x$  son mucho mayores que los términos de la forma  $q_x \partial \rho / \partial x$ , podemos eliminar  $\rho$  en ambos miembros de la Ecuación A.22. Insertando la Ley de Darcy tenemos:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.23})$$

Esta es la ecuación de flujo transitorio a través de un medio poroso anisótropo y saturado. Si el medio es homogéneo e isótropo, la Ecuación A.23 se reduce a:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.24})$$

El almacenamiento específico  $S_s$  se puede escribir como:

$$S_s = \rho g (\alpha + n\beta) \quad (\text{Ec. A.25})$$

donde  $\alpha$  es la compresibilidad del medio poroso,  $n$  es la porosidad del medio y  $\beta$  es la compresibilidad del agua. Se puede observar que el almacenamiento específico consta de dos partes:

$\rho g \alpha$ , es agua liberada del almacenamiento, debido a la compresión del esqueleto intergranular, por unidad de volumen y por unidad de caída de carga hidráulica.

$\rho g n \beta$ , es agua liberada del almacenamiento, debido a la expansión del agua, por unidad de volumen y por unidad de caída de carga hidráulica.

Dada la expresión anterior para  $S_s$ , la Ecuación A.24 se puede escribir como:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = \frac{\rho g (\alpha + n\beta)}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Ec. A.26})$$

A la cual se le conoce como Ecuación de Difusión.

#### 1.4. Condiciones de frontera

La solución de las ecuaciones de flujo requiere que se especifiquen condiciones de frontera durante todo el tiempo de simulación para proveer el número suficiente de ecuaciones adicionales y satisfacer los requerimientos de la técnica de solución (Zheng y Bennett, 2002).

Estas condiciones de frontera pueden ser elaboradas a partir de registros históricos o calcularse mediante funciones especificadas por el usuario. Se tienen varias combinaciones de condiciones de frontera externas, estas pueden consistir de una descarga cero, un caudal o nivel conocido en función del tiempo, o una curva de calibración conocida.

Generalmente hay tres tipos de condiciones de frontera en modelos de transporte:

1. Las concertaciones son especificadas a lo largo de una frontera para un periodo de tiempo específico, llamada la condición de frontera de Dirichlet:

$$C(x, y, z, t) = c(x, y, z) \quad \text{sobre } \Gamma_1 \quad \text{para } t > 0 \quad (\text{Ec. A.27})$$

donde  $\Gamma_1$  denota una frontera de concentración especificada y  $c(x, y, z)$  es la concentración especificada a lo largo de  $\Gamma_1$ .

En modelación de flujo una condición de frontera de Dirichlet es una frontera de carga especificada.

2. Los gradientes de concentración son especificados a lo largo de una frontera, es llamada la condición de frontera de Neuman. En esta clasificación de condición de frontera, el gradiente de concentración es especificado normal a la frontera, el cual implica que el flujo dispersivo cruza esta frontera, es dada por:

$$-D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} = f_i(x, y, z) \quad \text{sobre } \Gamma_2 \quad \text{para } t > 0 \quad (\text{Ec. A.28})$$

donde  $f_i(x, y, z)$  es una función representativa del flujo normal dispersivo para la frontera  $\Gamma_2$ .

3. La combinación de las condiciones dos condiciones de frontera anteriores es llamada condición de frontera de Cauchy. Esta condición implica que los flujos dispersivos y advectivos cruzan la frontera y se especifica:

$$-D_{ij} \frac{\partial C}{\partial x_j} + v_i C = g_i(x, y, z) \quad \text{sobre } \Gamma_3 \quad \text{para } t > 0 \quad (\text{Ec. A.29})$$

donde  $g_i(x, y, z)$  es una función representativa del flujo total (dispersivos y advectivos) normal a la frontera  $\Gamma_3$ .