



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

**POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

**Índices de calidad del agua y vulnerabilidad  
acuífera de un sistema hidrogeológico: caso valle  
de San Luis Potosí**

Tesis que presenta

**Oscar Guadalupe Almanza Tovar**

Para obtener el grado de

**Maestro en Geociencias Aplicadas**

**Director de la Tesis:**

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

San Luis Potosí, S.L.P., Octubre de 2015



## Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Índices de calidad de agua y vulnerabilidad acuífera de un sistema hidrogeológico: caso valle de San Luis Potosí**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **Oscar Guadalupe Almanza Tovar** y aprobada el **dieciséis de octubre del dos mil quince** 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. Germán Santacruz de León**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dra. Briseida López Álvarez**  
Miembro del Comité Tutorial

**Dr. José Tuxpan Vargas**  
Miembro del Comité Tutorial



## **Créditos Institucionales**

Esta tesis fue elaborada en las instalaciones de 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 (559733) 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 010 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 16 días del mes de octubre del año 2015, se reunió a las 15:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Germán Santacruz de León</b>	<b>Secretario</b>	<b>COLSAN</b>
<b>Dra. Briseida López Álvarez</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>COLSAN</b>
<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>

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

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Oscar Guadalupe Almanza Tovar**

sobre la Tesis intitulada:

*Indices de calidad de agua y vulnerabilidad acuífera de un sistema hidrogeológico: caso valle de San Luis Potosí*

que se desarrolló bajo la dirección de

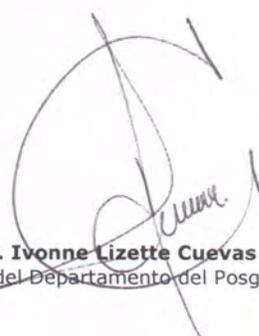
**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 16:15 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 16 días del mes de octubre de 2015.

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

  
**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



## **Dedicatorias**

Esta tesis esta dedicada a todas las personas que han hecho posible con su apoyo y cariño, seguir mis sueños.

A mi madre

Por todo el cariño y amor que me ha dado, el siempre estar ahí cuando mas la necesitaba y gracias por siempre decirme “hijo tu lo puedes todo”.

A mi novia (Azeneth)

Por todo su apoyo y amor en estos años, siempre estuviste ahí para motivarme, animarme, para no dejar que nunca me rindiera y gracias por estar ahí continuamente recordándome mis sueños.

A mis tíos (Isabel y Miguel Angel) Por siempre apoyarme y quererme tanto.

**GRACIAS**

## **Agradecimientos**

Al CONACYT por la beca otorgada para realizar una maestría, incentivando la investigación.

A la División de Geociencias Aplicadas, por brindarme la oportunidad de ser parte de su programa de maestría y la completa formación académica que recibí.

Al Dr. José Alfredo Ramos Leal, por ser un gran maestro, siempre estar dispuesto a enseñar cada vez más, por nunca limitarme académicamente sino todo lo contrario por incentivar en cada día hacer mejor las cosas, por apoyarme cuando no tenía la obligación, muchas gracias.

Con la Dra. Briseida López Álvarez y el Dr. Germán Santacruz de León, por la gran ayuda, orientación y paciencia en el desenvolvimiento de la tesis, el permitirme formar parte de un gran equipo de trabajo, gracias por su apoyo.

Para el Dr. José Tuxpan Vargas, por caracterizarse como un gran maestro por permitirme asistir en sus clases, cuando le solicitaba apoyo y siempre darme orientación, muchas gracias.

A Gabriela Perez Assaf, por su paciencia, siempre tener una buena actitud y nunca desesperarse, muchas gracias.

# Contenido

## Índices de calidad del agua y vulnerabilidad acuífera de un sistema hidrogeológico: caso valle de San Luis Potosí

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Lista de tablas	x
Lista de figuras	xii
Resumen	xiv
Abstract	xv
1. Generalidades	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivo particular	4
1.3. Justificación	4
1.4. Hipótesis	5
1.5. Área de estudio	5
1.6. Fisiografía	6
1.7. Clima	6
1.8. Edafología	6
1.9. Hidrografía	6
1.10. Uso de suelo y vegetación	7
2. Marco hidrogeológico	8
2.1. Geología	8
2.2. Sistema acuífero	10
2.2.1. Acuífero colgado	10
2.2.2. Acuífero medio granular	11
2.2.3. Acuífero fracturado profundo	12
3. Marco Teórico	13

3.1. Metodología de la calidad del agua para consumo humano	13
3.1.1. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994	13
3.1.1.1. Límites permisibles de características microbiológicas	14
3.1.1.2. Límites permisibles de características químicas	14
3.1.2. Índice de calidad del agua para consumo humano (ICA)	15
3.1.3. Índice de Contaminación (ICON)	16
3.2. Metodología para la calidad del agua para uso agrícola	18
3.2.1. Condición de sodicidad	19
3.2.1.1. Relación de adsorción de sodio (RAS)	20
3.2.1.1.1. Diagrama para la clasificación del agua de riego	20
3.2.1.2. Porcentaje de sodio (%Na)	22
3.2.1.2.1 Diagrama de Wilcox (%Na vs CE)	23
3.2.1.3. Porcentaje de sodio soluble (PSS)	25
3.2.1.4. Relación de Kelly	25
3.2.1.5. Carbonato de Sodio Residual (CSR)	25
3.2.2. Condición de salinidad	26
3.2.2.1 Salinidad Efectiva (SE)	26
3.2.2.2. Salinidad Potencial (SP)	26
3.2.2.2.1. Gráfico de salinidad efectiva y potencial	27
3.2.2.3. Relación de Adsorción de Magnesio	28
3.2.2.4. Índice de Permeabilidad	30
3.2.2.5. Gráfico de Doneen para el Índice de Permeabilidad.	31
3.3. Metodología para la calidad del agua para uso industrial	32
3.3.1. Industria de hierro y acero	32
3.3.2. Industria de las bebidas y alimentos	33
3.4. Metodología para la Vulnerabilidad del Agua subterránea	35
3.4.1. Peso del parámetro	36
3.4.2. Rango de ponderación	37
3.4.3. Profundidad del nivel estático (D)	37
3.4.4. Recarga neta (R)	38
3.4.5. Medio acuífero (A)	39
3.4.6. Tipo de suelo (S)	40
3.4.7. Gradiente topográfico (T)	40
3.4.8. Impacto a la zona vadosa (I)	41
3.4.9. Conductividad hidráulica (C)	43

4. Resultados	43
4.1. Evaluación de la calidad del agua para consumo humano	43
4.1.1. Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994	43
4.1.1.1. Límites permisibles de características microbiológicas	43
4.1.1.2. Límites permisibles de características químicas	43
4.1.2. Índice de calidad del agua subterránea (ICA)	44
4.1.3. Índice de contaminación (ICON)	46
4.2. Evaluación de la calidad del agua para uso agrícola	48
4.2.1. Clasificación del agua en base al diagrama de Wilcox	49
4.2.2. Porcentaje de sodio (%Na)	49
4.2.3. Salinidad Efectiva (SE)	52
4.2.4. Salinidad Potencial (SP)	55
4.2.5. Índices de Permeabilidad (IP), Índice de Relación de Kelley (RK), Relación de Adsorción de Magnesio (RAM) y Porcentaje de Sodio Soluble (PSS)	55
4.3. Evaluación de la calidad del agua para uso industrial	56
4.3.1. Industria del hierro y acero	59
4.3.2. Industria de bebida y alimentos	59
4.4. Vulnerabilidad acuífera	64
4.4.1. Profundidad del nivel estático (Dr)	64
4.4.2. Recarga neta (Rr)	65
4.4.3. Medio acuífero (Ar)	67
4.4.4. Tipo de Suelo (Sr)	67
4.4.5. Gradiente Topográfico (Tr)	67
4.4.6. Impacto a la zona vadosa (Ir)	68
4.4.7. Conductividad hidráulica (Cr)	68
4.4.8. Evaluación de la vulnerabilidad acuífera DRASTIC	72
5. Conclusiones	73
Bibliografía	75

## Lista de tablas

Tabla 3.1.- Muestras que están fuera del límite permisible en la NOM-127-SSA1-1994, para el contenido de organismos.	29
Tabla 3.2.- Muestras que presentan características físicas y organolépticas fuera de los límites permisibles	29
Tabla 3.3.- Clasificación de la constante “K” en relación de las características físicas y organolépticas del agua.	31
Tabla 3.4.- Clasificación del Índice de Calidad del Agua (Fernández-Vítora, 2009; Martínez de Bascaran, 1979).	31
Tabla 3.5.- Clasificación del agua según el índice del ICON.	32
Tabla 3.6.- Ecuaciones estándar utilizadas para determinar la calidad agronómica del agua subterránea.	33
Tabla 3.7.- Clasificación del riesgo de salinidad en el agua de riego.	36
Tabla 3.8.-clasificación para conductividad eléctrica y porcentaje de sodio	38
Tabla 3.9.- Clasificación del porcentaje de sodio soluble (PSS)	40
Tabla 3.10.- Clasificación de la relación de Kelley en el agua de riego	40
Tabla 3.11.- Clasificación del carbonato de sodio residual	41
Tabla 3.12.- Clasificación para salinidad efectiva del agua para uso agrícola	42
Tabla 3.13.- Clasificación para salinidad potencial del agua para uso agrícola	43
Tabla 3.14.- Clasificación del gráfico de interpretación para salinidad efectiva y potencial.	43
Tabla 3.15.- Clasificación de la relación de adsorción de magnesio en el agua de riego	45
Tabla 3.16.- Clasificación del índice de permeabilidad	46
Tabla 3.17.- Directrices de calidad del agua para la industria del hierro y el acero (Concentraciones en mg/L a menos que se indique lo contrario)	47
Tabla 3.18.- Calidad del agua recomendada para la industria de bebida y alimentos	48
tabla 3.18.- Parámetros en el método DRASTIC	51
Tabla 3.19.- Ponderaciones asignadas a los parámetros de DRASTIC	51
Tabla 3.20.- Clasificación de la profundidad del nivel estático ( $D_w=5$ )	52

Tabla 3.21.- Clasificación de recarga neta ( $R_w= 4$ )	53
Tabla 3.22.- Clasificación del medio acuífero ( $A_w= 3$ )	54
Tabla 3.23.- Clasificación del tipo de suelo ( $S_w= 2$ )	54
Tabla 3.24.- Clasificación para el gradiente topográfico ( $T_w= 1$ )	55
Tabla 3.25.- Clasificación del impacto a la zona vadosa ( $I_w= 5$ )	56
Tabla 3.26.- Clasificación de la conductividad hidráulica ( $C_w= 3$ )	56
Tabla 3.27.- Escala de color utilizada el índice DRASTIC (Aller et al., 1987)	57
Tabla 4.1.- Muestras que están fuera del límite permisible en la NOM-127-SSA1-1994, para el contenido de organismos.	58
Tabla 4.2.- Muestras que presentan características físicas y organolépticas fuera de los límites permisibles.	59
Tabla 4.3.- Clasificación del agua según el índice del ICA, en el acuífero colgado y el acuífero medio-profundo.	60
Tabla 4.4.- Clasificación del agua según el índice del ICON, en el acuífero colgado y el acuífero medio-profundo.	62
Tabla 4.5.- Estadística de la obtención de la recarga natural	80

## Lista de figuras

Figura 1.1.- Ubicación del área de estudio en el Valle de San Luis Potosí.	21
Figura 1.2.- Usos de suelo en el Valle de San Luis Potosí	22
Figura 1.3.- Geología regional de San Luis Potosí.	23
Figura 1.4.- Sección geológica A - A' de la geología regional de la Figura 1.2.	25
Figura 4.1.- Distribución espacial del Índice de Calidad del Agua (ICA).	61
Figura 4.2.- Distribución espacial del Índice de Contaminación (ICON).	63
Figura 4.3.- Mapas de distribución espacial de la clasificación del diagrama de Wilcox (RAS vs CE).	66
Figura 4.4.- Distribución espacial del índice porcentaje de sodio (%Na).	69
Figura 4.5.- Distribución espacial del índice de salinidad efectiva, a) acuífero colgado y b) acuífero medio-profundo y salinidad potencial c) acuífero somero y d) acuífero medio-profundo	72
Figura 4.6.- Mapa de distribución de la calidad del agua para la industria de hierro y acero.	77
Figura 4.7.- Mapa de distribución de la calidad del agua para la industria de la bebida y alimentos.	78
Figura 4.8.- Mapas de Distribución de los parámetros del índice DRASTIC	84
Figura 4.9.- Distribución espacial del índice de Vulnerabilidad acuífera	85
Figura 4.10.- Distribución espacial del índice de Vulnerabilidad acuífera DRASTIC Normalizado.	86
Gráfico 3.1.- Clasificación de salinidad de Estados Unidos de manantiales y aguas subterráneas para riego (Richards, 1954).	37
Gráfico 3.2.- Porcentaje de sodio vs Conductividad eléctrica.	39
Gráfico 3.3.- Salinidad potencial vs salinidad efectiva	44
Gráfico 3.4.- Clasificación Doneen (Índice de Permeabilidad.	46
Gráfico 4.1.- Diagrama de relación de adsorción de sodio y conductividad eléctrica	65
Gráfico 4.2.- Gráfico de conductividad eléctrica vs porcentaje de sodio.	68

Gráfico 4.3.- Evaluación de salinidad potencial vs salinidad efectiva.	71
Gráfico 4.4.- Clasificación Doneen del agua de riego en base al índice de Permeabilidad	73

## **Resumen**

Titulo de la Tesis: Índices de calidad del agua y vulnerabilidad acuífera de un sistema hidrogeológico: caso valle de San Luis Potosí

**PALABRAS CLAVE:** ICA, ICON, DRASTIC, SISTEMA ACUÍFERO

El Valle de San Luis Potosí (VSLP) tiene la mayor densidad de población en la zona del municipio de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, los cuales han tenido durante su historia un continuo cambio en los usos de suelo. Derivado de los de estos cambios y condiciones de entorno naturales, se tiene como consecuencia el deterioro de la calidad del agua, además de una sobre explotación del sistema acuífero causando abatimiento en sus niveles piezométricos. Debido a la situación actual del sistema acuífero es necesario evaluar la calidad del agua y la vulnerabilidad acuífera, con el fin de tener un punto de vista integral y objetivo de la problemática presente, para cubrir la necesidad de un uso adecuado y eficiente del agua. El sistema acuífero del VSLP esta formado por un acuífero somero (colgado), un acuífero medio compuesto por material granular y un acuífero profundo formado por roca volcánica fracturada. La evaluación integral se llevo considerando el acuífero colgado, por medio de muestras de agua obtenidas en norias y se agrupo el acuífero medio y profundo, por medio de muestras tomadas en pozos. La evaluación de la calidad del agua, se consideraron aspectos de la NOM-127-SSA1-1994 e índices de calidad del agua aplicables a cada actividad (Consumo humano, uso agrícola e industrial). Para el análisis de vulnerabilidad del sistema acuífero, se aplico la metodología "DRASTIC". Los resultados obtenidos denotan una menor calidad para el acuífero colgado en comparación al acuífero medio y profundo. En el acuífero somero, el uso del agua para actividades agrícolas va de buena a condicionada, en contraste al uso del agua para consumo humano e industrial donde mostró una mala calidad en la mayor parte del VSLP, mientras que para el acuífero medio y profundo tuvo una calidad de agua en su mayoría buena a condicionada en los tres usos. La vulnerabilidad acuífera del sistema muestra que en el acuífero somero, la zona urbana y conurbada es muy vulnerable, en tanto que, en el acuífero medio profundo, la zona centro presenta rangos de vulnerabilidad de media a baja. La relación de calidad del agua y vulnerabilidad acuífera tienen buena correlación.

## **Abstract**

Title of the thesis: indices water quality and groundwater vulnerability of a hydrogeological system: case valley of San Luis Potosi

KEY WORDS: WQI, CONTAMINATION INDEX, DRASTIC, AQUIFER SYSTEM

The Valley of San Luis Potosi (VSLP) has the highest population density in the area of the municipality of San Luis Potosi and Soledad de Graciano Sánchez, which have had during its history a continuous change in land use. Derived from these changes and conditions of natural environment, it results in the deterioration of water quality, in addition to over-exploitation of the aquifer system causing depression in their groundwater levels. Due to the current situation of the aquifer system it is necessary to assess water quality and aquifer vulnerability, in order to have a holistic view of the problem and present objective, to meet the need for a proper and efficient use of water. VSLP the aquifer system is formed by a shallow aquifer (hook), a medium consisting of granular material aquifer and a deep aquifer consists of fractured volcanic rock. The comprehensive evaluation was considering hanging aquifer through water samples obtained in wells and medium deep aquifer was grouped, using samples taken from wells. The assessment of the water quality aspects of NOM-127-SSA1-1994 and water quality indices relating to each activity (human consumption, agricultural and industrial use) were considered. For the analysis of vulnerability of the aquifer system, "DRASTIC" methodology was applied. The results denote lower quality for hanging aquifer compared to medium and deep aquifer. In the shallow aquifer, water use for agricultural activities is good to conditional, in contrast to the use of water for human and industrial consumption which showed a poor quality in most of the VSLP, while the middle and a deep aquifer had Water quality mostly good to conditional uses in all three. The aquifer vulnerability of the system shows that the shallow aquifer, urban and metropolitan area is very vulnerable, while in the medium deep aquifer, the downtown area has vulnerability ranges from medium to low. The ratio of water quality and aquifer vulnerability have good correlation.

## 1. Generalidades

### 1.1. Introducción

En el desarrollo de las actividades del ser humano el agua es vital, la demanda del agua continua creciendo, lo cual va incrementando la presión sobre este recurso hídrico (UNESCO/WWDR, 2014), el recurso del agua se encuentra en crisis, esta condición está empeorando día tras día, hasta que se lleven a cabo medidas mitigantes y subsecuentemente correctivas, se debe esencialmente a la aplicación de métodos inadecuados en la gestión de los recursos hídricos (UNESCO/WWDR, 2003).

El agua tiene un gran impacto en el desarrollo de las diferentes actividades humanas. En general, en México el uso del agua, tiene la siguiente distribución, el uso agrícola 75.7%, abastecimiento público 14.6%, industrial 4.2 % y termoeléctricas 5.5 %, siendo el uso agrícola el que utiliza el mayor volumen. En el estado de San Luis Potosí, el uso agrícola consume el 63.9 %, el abastecimiento público el 32.8%, la industria 1.7% y 1.6% es utilizado en la generación de energía eléctrica (CONAGUA, 2013). De acuerdo a la proyección en el sector del agua mexicano, la demanda se incrementará significativamente en las próximas décadas (CONAGUA, 2014d). El aprovechamiento de los recursos hídricos, implica la evaluación de la cantidad y de la calidad del agua para garantizar un manejo adecuado y eficiente.

En este trabajo se tomarán dos elementos, que son la calidad del agua y la vulnerabilidad. La calidad del agua es definida por las características químicas, físicas y biológicas que limitan su uso para una actividad humana (UNESCO/WHO/UNEP, 1996), llevando a cabo un uso eficiente, es esencial tener una calidad de agua idónea, establecidos por los criterios de evaluación, que se designan dependiendo al uso (EPA, 2014). En cuanto el término de vulnerabilidad del agua subterránea (Margat, 1968), es el término más común empleado, para establecer que tan propensa es el agua subterránea a ser contaminada.

Se aplicó una metodología de análisis con la interacción de índices de calidad de agua e índice de vulnerabilidad acuífera, para evaluar la calidad y la vulnerabilidad del agua subterránea, en el Valle de San Luis Potosí (VSLP), conformada por el municipio de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sanchez, Cerro de San Pedro y Mexquitic de Carmona, cuenta con un sistema hidrogeológico formado por un acuífero colgado, acuífero medio granular y acuífero fracturado profundo, en este análisis se agruparon en acuífero colgado y acuífero medio-profundo. Obteniendo los índices de calidad y vulnerabilidad del agua subterránea para cada acuífero.

El VSLP tiene un intervalo de elevación que va de 700 a 2,800 msnm, rangos de temperatura de 12-20 °C y de precipitación de 200-600 mm. Se sitúa en región hidrológica El Salado, la zona urbana esta creciendo hacia terrenos que fueron ocupados por agricultura y pastizales (INEGI, 2009). Tiene el acuífero una condición de déficit y se encuentra sobre explotado (CONAGUA, 2014a).

El análisis integral del área de estudio del VSLP, consideró índices de evaluación de acuerdo al uso y las condiciones de entorno del sistema hidrogeológico, para identificar las zonas con calidad deficiente y el origen natural o antropogénico.

En la evaluación de la calidad del agua, se consideraron aspectos de la norma oficial vigente e índices de calidad del agua aplicables a cada actividad (Consumo humano, uso agrícola e industrial).

Para el consumo humano se tomaron en cuenta la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127, 2000), el índice de calidad del agua "ICA" y el índice de contaminación "ICON" (Backman, Bodiš, Lahermo, Rapant, y Tarvainen, 1998). Indicándonos el estado físico y químico de las muestras de agua. Con lo cual se pueden obtener medidas correctivas o atenuantes de acuerdo a los contaminantes existentes e identificar las zonas propensas y su fuente de contaminación.

En cuanto al uso agrícola se utilizaron índices que evalúan condiciones de salinidad y sodicidad. Con ellos podemos identificar problemáticas en los cultivos y proponer cultivos idóneos para las características del suelo.

El uso industrial es evaluado con un índice que está ponderado de acuerdo a la actividad específica a desarrollar, siendo considerados los parámetros físico-químicos. Con el podemos encontrar áreas potenciales o factibles para el establecimiento de industria de acuerdo a la materia prima resultante.

Para el análisis de las condiciones de entorno en que se encuentra el acuífero, se emplea el concepto de vulnerabilidad acuífera, aplicado con la metodología “DRASTIC” (Aller, Lehr, Petty, y Bennett, 1987).

Las ventajas de utilizar la NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127, 2000), el ICA e ICON en el uso del agua para consumo humano, es dar una evaluación del estado físico y químico del agua, identificando con las tres metodologías sitios donde la calidad del agua es deficiente. En cuanto a la vulnerabilidad acuífera obtenemos un panorama de las zonas propensas a contaminarse, las cuales serían existentes y potenciales, en las zonas existentes deberán correlacionarse con lo obtenido en la evaluación de la calidad del agua, con lo que se encontraría una correlación y las zonas potenciales a ser vulnerables daría pauta a tener cuidados preventivos.

Al hacer una evaluación integral con la calidad del agua y vulnerabilidad acuífera se obtiene un análisis completo de la zona de estudio, detectando problemáticas existentes y potenciales.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

- ❖ Evaluar la vulnerabilidad y la calidad del agua subterránea del sistema

hidrogeológico, Para identificar posibles fuentes potenciales y zonas de contaminación.

### 1.2.1. Objetivo particular

- ❖ Evaluar la calidad del agua para consumo humano, uso agrícola e industrial, Representar su clasificación de acuerdo a los índices establecidos y mostrarlos espacialmente en el sistema acuífero.
- ❖ Identificar los parámetros afectados y mostrar la problemática resultante en cada acuífero. Conocer los factores que originan el decaimiento en la calidad del agua sistema acuífero.
- ❖ Evaluar el índice de vulnerabilidad acuífera (DRASTIC) y su representación espacial. Determinar las condiciones detonantes en las áreas afectadas, definiendo fuentes presentes o potenciales de contaminación sistema acuífero.

### 1.3. Justificación

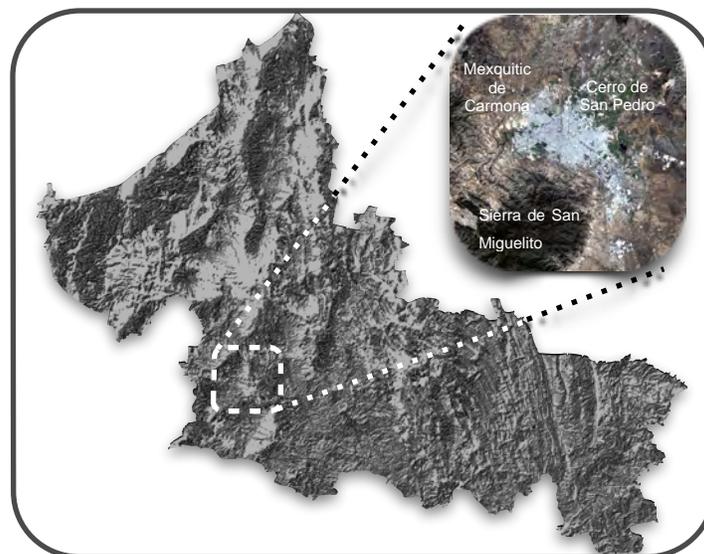
En la zona metropolitana del VSLP concentra el 40% de la población y el 78% del PIB estatal (INEGI, 2010). Las actividades que se desarrollan utilizan el 92 % de agua por origen subterráneo. El sistema acuífero del VSLP se considera como acuíferos urbanos, debido a sus usos y por que la mayor parte del acuífero se encuentra bajo la zona urbana, lo que incrementa el riesgo de contaminación y subsidencia. Sin embargo no ahí estudios de vulnerabilidad acuífera, por lo cual se desconoce su situación de vulnerabilidad. En este trabajo se busca identificar los factores que propician la contaminación o decaimiento en la calidad del agua y relacionando con la vulnerabilidad acuífera para establecer zonas presentes y potenciales de riesgo en el sistema hidrogeológico. Los resultados de la investigación darán información útil para un uso adecuado al agua y tomar medidas preventivas en sitios potenciales de riesgo, donde puede ser afectado por factores naturales como antropogénicos con respecto calidad del agua o vulnerabilidad del sistema hidrogeológico.

## 1.4. Hipótesis

En el área de estudio se han presentado procesos continuos de cambio de uso de suelo, sobre todo un notable incremento de la zona urbana, aumentando a su vez la explotación del agua subterránea, lo que ha provocado el deterioro de la calidad del agua en el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, lo que incrementa la denominada vulnerabilidad acuífera. En un sistema acuífero la vulnerabilidad debe cambiar entre las unidades someras y profundas del sistema hidrogeológico.

## 1.5. Área de estudio

El área de estudio se encuentra en el estado de San Luis Potosí en el Valle de San Luis Potosí (VSLP) formada por los municipios de San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sanchez, Cerro de San Pedro y Mexquitic de Carmona (**Figura 1.1**). La ubicación está entre las coordenadas correspondientes en X= 287239 a 313500 y en Y= 2432230 a 2463000. Se clasificó en tres zonas de acuerdo con su actividad; la zona urbana, agrícola e industrial (López-Álvarez, Ramos-Leal, Moran-Ramírez, Cardona Benavides, y Hernández Garcia, 2013). El área ocupa el 4.6% de la superficie del estado (INEGI, 2009).



**FIGURA 1.1.- UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ.**

## 1.6. Fisiografía

Se encuentra en en dos provincias Mesa del Central y Sierra Madre Oriental. Conformada por las subprovincias Sierras y llanuras del norte de Guanajuato, Llanuras y Sierras Potosino-Zacatecanas, Sierras y Llanuras Occidentales y Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes.

El Sistema de topofomas está definido mayormente por la Sierra alta escarpada con mesetas con 24.6 % (INEGI, 2009).

## 1.7.Clima

El tipo de clima es Templado con verano cálido semiárido y semiseco templado con verano cálido. La temperatura media anual es de 17.5°C y cuenta con un rango de temperaturas de -9°C a 38°C. El área de estudio cuenta con una evaporación media anual de 2038.7 mm. La precipitación media anual es de 402.6 mm.(CONAGUA, 2009)

## 1.8. Edafología

Para el área de estudio se cuenta con una variedad de presencia de suelos teniendo su mayor porcentaje de distribución para el municipio de San Luis Potosí de Leptosol (45.7%), Durisol (15.4%) y Calcisol (13.9%). En el municipio de Soledad de Graciano Sánchez Durisol (58.5%) es el predominante, seguido por el Leptosol (16.8%), Phaeozem (11.1%) y Vertisol (7%), mientras que para el municipio de Cerro de San Pedro tiene Leptosol (74.7%), Durisol (20.9%), Vertisol (2.7%) y Phaeozem (1.6%) y el municipio de Mexquitic de Carmona se caracteriza mas por Leptosol (56.1%), Cambisol (13.6%), Phaeozem (12.2%) (INEGI, 2009).

## 1.9. Hidrografía

La zona geohidrológica del Valle de San Luis Potosí se ubica dentro de la Región Hidrológica N° 37 denominada El Salado, caracterizada por cuencas de drenaje

endorréico.

La zona del Valle de San Luis Potosí comprende la cuenca del río Santiago, su principal colector y se forma a partir de los escurrimientos que proceden de una serie de pequeñas sierras situadas al W y SW de la Ciudad de San Luis Potosí. Sobre él se han construido dos presas para control de avenidas denominadas San José y El Peaje (CONAGUA, 2009).

### 1.10. Uso de suelo y vegetación

La distribución en los usos de suelo el área de estudio tiene su mayor ocupación la zona agrícola de riego, siguiendo la zona urbana y con menor área la zona industrial como se muestra en la **Figura 1.2** (López-Álvarez et al., 2013). En cuanto a la vegetación, predomina el matorral, y pastizal, bosque y mezquital en menor ocupación.

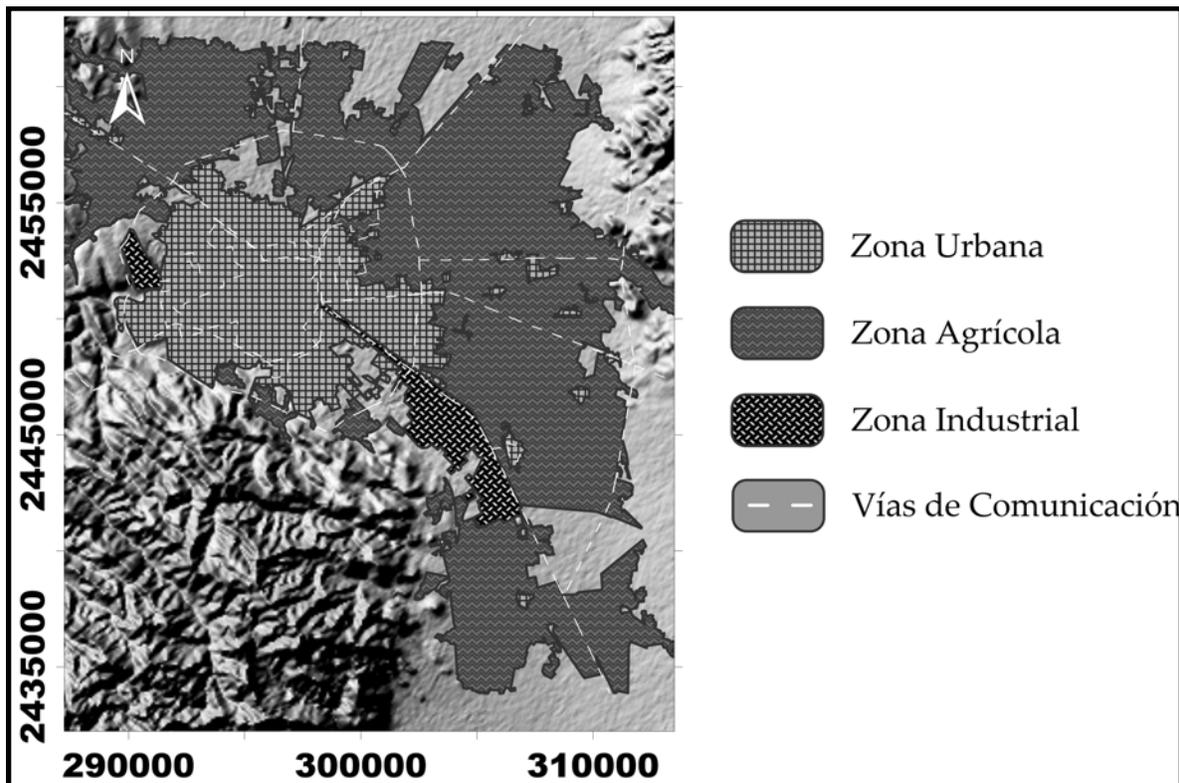
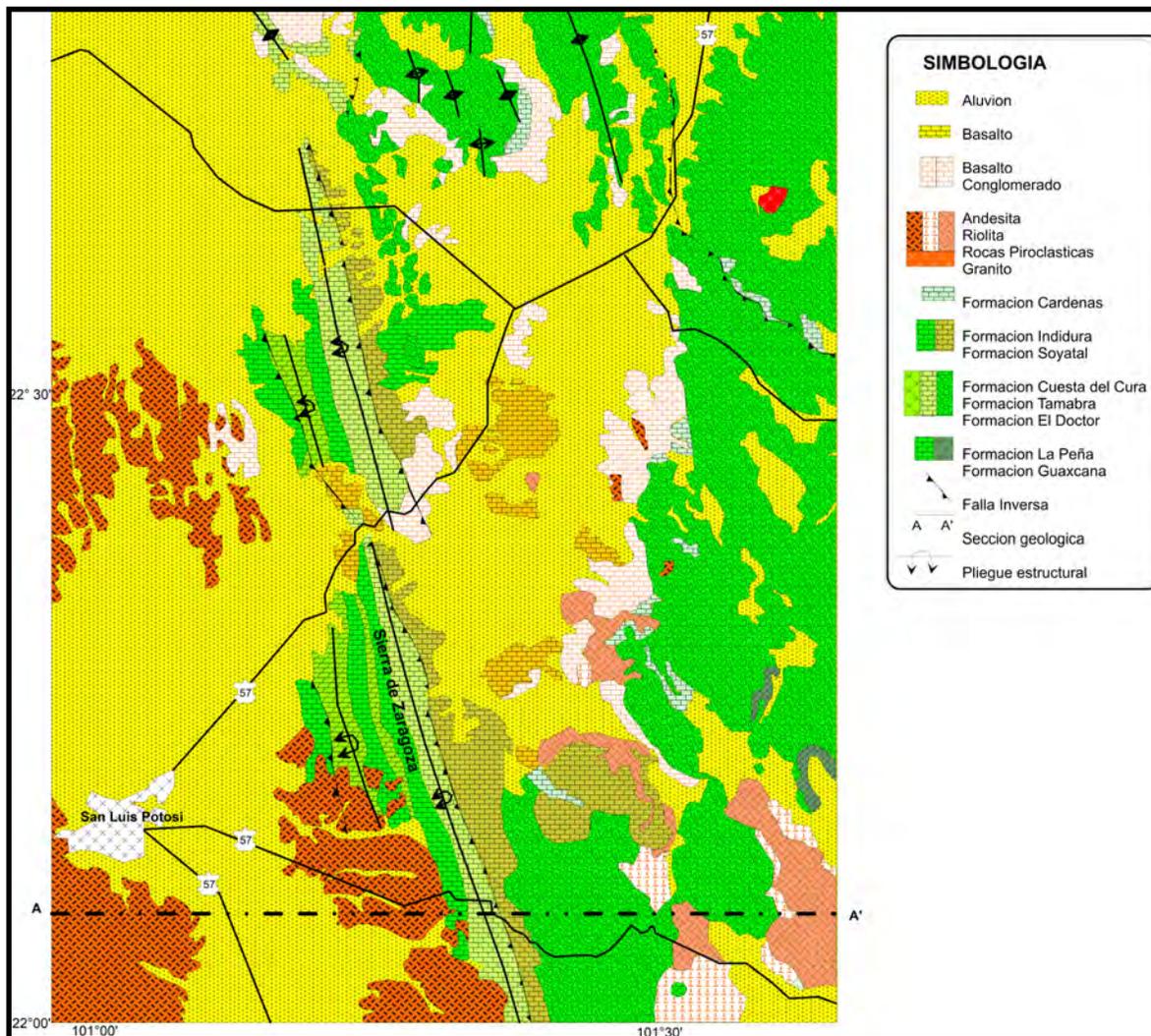


FIGURA 1.2.- USOS DE SUELO EN EL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ

## 2. Marco hidrogeológico

### 2.1. Geología

El Valle de San Luis Potosí, está formado por rocas sedimentarias y volcánicas cuyas edades van del Cretácico al Reciente (Guillermo Labarthe-Hernández, Tristán-González, y Aranda-Gómez, 1982; Ramos-Leal, Martínez-Ruiz, Rangel-Mendez, y de la Torre, 2007) (**Figura 1.3**).



**FIGURA 1.3.- GEOLOGÍA REGIONAL DE SAN LUIS POTOSÍ.**

Las rocas sedimentarias del Cretácico están constituidas por las formaciones Indidura y Cuesta del Cura del Cretácico Tardío. Estas unidades están

ampliamente expuestas al W de la Sierra de Álvarez, algunos escasos afloramientos en el valle al Sur de la Sierra de San Miguelito, en los alrededores de Mexquitic y Aqualulco (Guillermo Labarthe-Hernández et al., 1982; Ramos-Leal et al., 2007). En el Valle de San Luis Potosí, las calizas del cretáceo fueron cortadas en el pozo Rivera a profundidades de 700 a 1200 m. Su litología está formada por calizas arcillosas de ambientes de cuenca, lo cual reduciría los valores conductividad hidráulica primaria y no funcionan como acuíferos; sin embargo, localmente se ha encontrado agua en fallas y facturas regionales que cortan estas unidades geológicas (IPICYT, 2006).

Las unidades del cretáceo, se encuentra expuesta al sur del Valle de San Luis Potosí la Formación Cenicera del Terciario Temprano (Aguillón-Robles, Aranda-Gómez, y Solorio-Munguía, 1994) (**Figura 1.4**). En el valle se encuentra a profundidades de 550 a 1000 m. Está constituida por conglomerados, arenisca, limo y arcilla poco consolidados; tiene un espesor variable que puede ser de un metro hasta de 150 m. Debido al cementante silíceo que presentan las rocas de ésta formación, no se considera como acuífero.

Cubriendo a la Formación Cenicera, se localiza la Latita Portezuelo del Oligoceno Tardío. Esta formación se encuentra aflorando principalmente hacia el oriente en los lomeríos del área de estudio. En el Valle de San Luis Potosí, se localiza a profundidades de 100 a 650 m; está constituida por una capa de color gris claro con fenocristales de feldespatos y magnetita como accesorio. Tiene un espesor aproximado de 450 m (**Figura 1.4**). Esta Formación se encuentra expuesta en la Sierra de San Miguelito, en donde tiene condiciones de conductividad hidráulica baja, de tal manera que se han construido hasta siete presas de almacenamiento en el pasado. Sin embargo, debido a su fracturamiento en el valle, es el principal acuífero.

Hacia la parte occidente del valle se encuentra la formación Panalillo que cubre a la latita Portezuelo y a la riolita San Miguelito (Nieto-Samaniego, Macías-Romo, y

Alaniz-Alvarez, 1996). En el valle se encuentra a profundidades de hasta 250 m. Hacia el oriente del valle, las rocas volcánicas del Terciario fueron cubiertas por abanicos aluviales compuestos por fragmentos de caliza, pedernal y rocas volcánicas (latita, basalto y riolita). El espesor de estos depósitos aluviales es de unas decenas de metros (Nieto-Samaniego et al., 1996). Esta unidad tiene un espesor aproximado de 250 m (Nieto-Samaniego et al., 1996; Tristán-González, 1986).

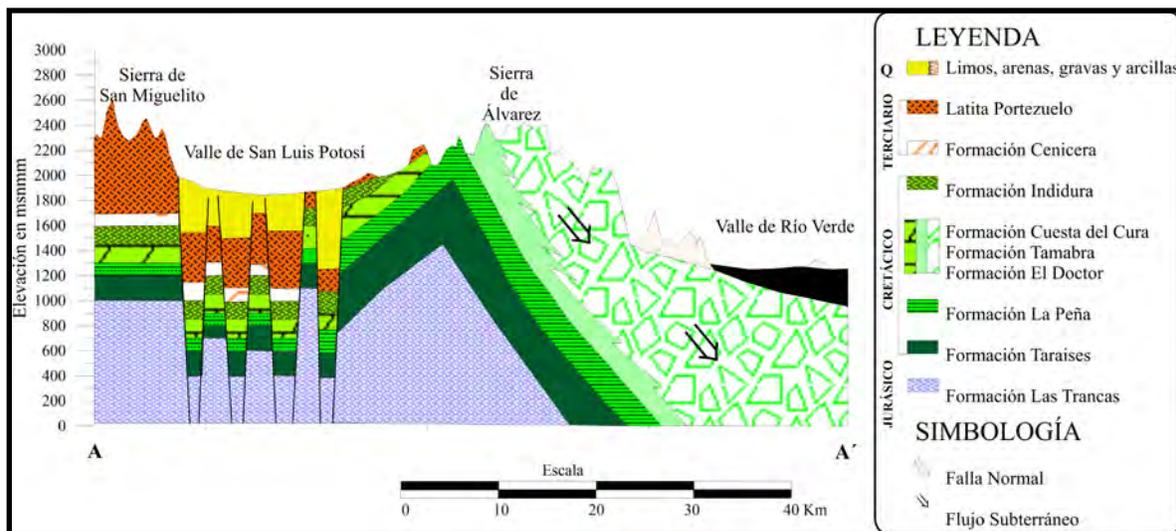


FIGURA 1.4.- SECCIÓN GEOLÓGICA A - A' DE LA GEOLOGÍA REGIONAL DE LA FIGURA 1.2.

## 2.2. Sistema acuífero

En el sistema hidrogeológico del Valle de San Luis Potosí, esta formado por un acuífero colgado, acuífero medio granular y acuífero fracturado profundo, para este trabajo se agrupó en acuífero colgado y acuífero medio-profundo.

### 2.2.1. Acuífero colgado

El acuífero colgado se localiza en la parte superior, cercano a la superficie es poco estudiado, con un espesor de 5 a 40 m (COTAS-SLP and CONAGUA-SLP, 2005) y profundidades menores a los 20 m, presenta una extensión limitada (en la zona urbana).

El material predominante son conglomerados inmersos en un matriz areno arcillosa y hacia el noreste del valle este material se adelgaza y predominan limos y arenas con características de baja conductividad hidráulica. Este acuífero se recarga a partir de la precipitación en el valle y su comportamiento es muy dinámico, tiene recarga inducida de tipo difusa (ocasionalmente por la fuga de agua potable y drenaje) y por retornos de riego (CONAGUA, 2009). 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 (Zaporozec, 2004).

La dirección de flujo del acuífero colgado va de suroeste a noreste. Su recarga depende de las condiciones como la 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 VSLP; así como, al Norte de la SSM hacia el Valle de Escalerillas (IPICYT, 2007b). Hacia la localidad de La Palma, se ubica el límite del acuífero colgado, en esta región el material granular se acuña y su contacto con el material volcánico fracturado es más próximo, por lo cual el flujo de éste puede tener comunicación hidráulica con el Acuífero medio granular.

### 2.2.2. Acuífero medio granular

El acuífero medio, está compuesto por un material granular, que rellenó las fosas tectónicas y ha sido el más explotado. Tiene pozos que alcanzan profundidades de hasta 350 m de material sedimentario. Su límite superior se encuentra aproximadamente de 100 a 150 m de profundidad y su espesor varía de 100 a 200 m. La parte central del valle está confinada por una capa sedimentaria poco permeable (arenisca, conglomerado, limo y arcilla) con valores de conductividad hidráulica de  $\sim 1 \times 10^{-4}$  m/s; la temperatura del agua en algunos de los pozos que la penetran alcanzan entre 23 y 27°C (CONAGUA, 2007). Las estructuras tectónicas (fallas y fracturas) controlan la distribución y espesor del relleno sedimentario, el

cual es mayor hacia la parte central de las fosas.

Las fallas geológicas que dieron origen al valle tectónico controlan la distribución y espesor de ésta unidad acuífera, por lo que el cono de abatimiento se ha desarrollado principalmente en la zona de relleno sedimentario de la fosa tectónica de San Luis Potosí. Los gradientes hidráulicos convergen hacia el cono de abatimiento regional. El cono se ha profundizado hasta 60 m de 1971 a 1995 (CONAGUA, 1996). 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, 2006).

### **2.2.3. Acuífero fracturado profundo**

El acuífero profundo formado por roca volcánica fracturada, tiene una distribución irregular debido a un sistema de fosas y pilares en el valle. Lo limita por un lado la Sierra de San Miguelito, la cual está formada por este mismo material; sin embargo, en la sierra las fracturas han sido selladas por actividad hidrotermal, dando condiciones de baja conductividad hidráulica. Por otro lado, el flanco W de la Sierra de Álvarez, cuyo origen marino dio origen a calizas, también es de muy baja conductividad hidráulica. Ambas fronteras tienen capacidad reducida para transmitir y almacenar agua por lo que limitan la recarga lateral. 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 VSLP. La profundidad a la superficie potenciométrica es mayor a 150 m, dependiendo de la ubicación dentro del valle. 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 (IPICYT, 2006; Ramos-Leal et al., 2007).

### **3. Marco Teórico**

Una de las alternativas a la evaluación de a problemática del deterioro de la calidad del agua se ve directamente relacionada con la vulnerabilidad acuífera, por condiciones de entorno y la calidad del agua.

Se llevo acaba por medio de la aplicación de metodologías independientes que se conjugaron para llegar a una evaluación integrar la de la problemática existente. De tal manera se emplearon las metodologías de evaluación de la calidad del agua para consumo humano, uso agrícola y uso industrial. Mientras que para evaluar la vulnerabilidad acuífera se empleo el método que satisfacía los requerimientos para llevarlo a cabo, siendo el método DRASTIC.

#### **3.1. Metodología de la calidad del agua para consumo humano**

Para evaluar la calidad del agua subterránea del sistema acuífero de la VSLP, se utilizó una la base de datos con 47 muestras de agua en norias para el acuífero colgado (IPICYT, 2007a; Morán Ramírez, 2009) y en el acuífero medio-profundo se empleó una base de datos con 50 muestras de agua tomadas en pozos (CONAGUA, 2007; IPICYT, 2007b).

En la evaluación de la calidad del agua para consumo humano, se tomaron en cuenta tres criterios establecidos, como lo son la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (NOM-127, 2000), el Índice de Calidad de Agua subterránea (ICA) (Couillard y Lefebvre, 1985) y el Índice de Contaminación (ICON) (Backman et al., 1998).

##### **3.1.1. Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994**

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, “Salud ambiental, agua para uso y consumo humano límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización”(NOM-127, 2000). Establece

que el agua para consumo humano con calidad adecuada es fundamental, para prevenir y evitar transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras; para lo cual a establecidos límites permisibles en cuanto a sus características bacteriológicas, físicas, organolépticas y químicas, en relación a los parámetros de las muestras que se obtuvieron.

### 3.1.1.1. Límites permisibles de características microbiológicas

Los resultados de los exámenes bacteriológicos se deben reportar en unidades de NMP/100 ml (número más probable por 100 ml), si se utiliza la técnica del número más probable o UFC/100 ml (unidades formadoras de colonias por 100 ml), si se utiliza la técnica de filtración por membrana, límites permisibles en (**Tabla 3.1**).

**TABLA 3.1.- MUESTRAS QUE ESTÁN FUERA DEL LÍMITE PERMISIBLE EN LA NOM-127-SSA1-1994, PARA EL CONTENIDO DE ORGANISMOS.**

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables
Organismos coliformes fecales	Ausencia o no detectables

### 3.1.1.2. Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido (**Tabla 3.2**). Los límites se expresan en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

**TABLA 3.2.- MUESTRAS QUE PRESENTAN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS FUERA DE LOS LÍMITES PERMISIBLES**

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Fierro	0.30
Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Manganeso	0.15
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	1.00

CARACTERÍSTICA	LÍMITE PERMISIBLE
pH (potencial de hidrógeno)	6.5-8.5
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50

Para la revisión de los parámetros obtenidos con la norma se realizaran tablas de comparación de resultado, lo que nos indicará los resultados que este fuera de los límites permisibles.

### 3.1.2. Índice de calidad del agua para consumo humano (ICA)

El índice utilizado para el área de estudio es el ICA el cual se adapta y se modifica al modelo propuesto.

La estimación del índice de calidad se obtiene con la evaluación numérica del ICA, con técnicas multiplicativas y ponderadas con la asignación de peso específico en relación de su concentración (Brown, McClelland, Deininger, y Tozer, 1970), obteniéndose a partir de una medida geométrica:

$$ICA = K \frac{\sum_{i=1}^n C_t P_t}{\sum_{i=1}^n P_t}$$

Donde “K” es la constante que se asigna de acuerdo a las características físicas del agua (**Tabla 3.3**),  $P_t$  son los pesos específicos asignados a cada parámetro (t), y ponderados entre 0 y 1, de tal forma que se cumpla que la sumatoria sea igual a uno.  $C_t$  es la calidad del parámetro (t), en función de su concentración y cuya calificación oscila entre 0 y 100 que califica la calidad, a partir del cual y en función del uso del agua, permite estimar el nivel de contaminación (**Tabla 3.4**).

**TABLA 3.3.- CLASIFICACIÓN DE LA CONSTANTE “K” EN RELACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS DEL AGUA.**

PESO	CARACTERÍSTICAS DEL AGUA
1.0	Para aguas claras sin aparente contaminación
0.75	Para aguas con ligero color, espuma, turbidez aparente no natural
0.50	Para agua con apariencia de estar contaminada y fuerte olor
0.25	Para aguas negras que presenten fermentaciones y olores

Se empleara la clasificación de los criterios generales según el índice de calidad del agua (**Tabla 3.4**), modificado de (Fernández-Vítora, 2009; Martínez de Bascaran, 1979).

**TABLA 3.4.- CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (FERNÁNDEZ-VÍTORA, 2009; MARTÍNEZ DE BASCARAN, 1979).**

NIVELES	ESCALA DE ICA	USO
90-100	Excelente	No requiere purificación para su consumo
80-89	Aceptable	Requiere purificación menor
70-79	Levemente contaminada	Dudoso su consumo sin purificación
50-69	Contaminada	Tratamiento de potabilización indispensable
40-49	Fuertemente contaminada	Dudoso para su consumo
0-39	Excesivamente contaminada	Inaceptable para su consumo

### 3.1.3. Índice de Contaminación (ICON)

El índice de contaminación ICON es otra forma de evaluar la contaminación del agua subterránea, el cual está representando la suma de factores que se encuentra excedidos según la Norma Oficial Mexicana NOM-127-1994 o la Environmental Protection Agency (EPA), con este índice es fácil ubicar los sitios que rebasan los límites de elementos y especies iónicas dañinas para la salud

humana (Backman et al., 1998).

Se evalúa con la ecuación (Backman et al., 1998)

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi}$$

$$C_{fi} = \frac{C_{Ni}}{C_{Ai}} - 1$$

Donde

$C_{fi}$  = factor de contaminación para el i-ésimo componente.

$C_{Ai}$  = valor analítico del pésimo componente.

$C_{ni}$  = Concentración superior permisible del i-ésimo componente (N significa valor normativo).

Los índices del ICON pueden ser positivos o negativos de acuerdo a su concentración química, los valores negativos indican que no se ha rebasado los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, se encuentran principalmente en zonas de recarga y/o zonas sin contaminación; mientras que los valores positivos se asocian con parámetros que han rebasado los límites de referencia y apuntan problemas de contaminación (**Tabla 3.5**).

**TABLA 3.5.- CLASIFICACIÓN DEL AGUA SEGÚN EL ÍNDICE DEL ICON.**

CONTAMINACIÓN	RANGO ICON
Baja	$\leq 1$
Media	1-3
Alta	$\geq 3$

## 3.2. Metodología para la calidad del agua para uso agrícola

La calidad del agua para uso agrícola se evalúa de acuerdo a límites que son propuestos por los índices a considerar, tomando en cuenta las condiciones de salinidad y sodicidad.

En la clasificación del agua de riego, se asume que el agua podría ser usada en condiciones normales con respecto a la textura del suelo, velocidad de infiltración, drenaje, cantidad del agua usada, clima y tolerancia del cultivo. Las desviaciones de los rangos promedios de alguna condición hacen insegura el uso de esta agua o necesitaría de algunas condicionantes (L. V. Wilcox, 1955).

Para obtener la calidad del agua destinada al uso agrícola, se determinó el riesgo de salinidad (conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales, salinidad efectiva y salinidad potencial) y el riesgo de sodicidad (relación de adsorción de sodio), son considerados como un indicador de la conveniencia o limitación del empleo del agua en el riego agrícola; aplicando los índices de Relación Adsorción de Sodio (RAS), Porcentaje de Sodio (%Na), Porcentaje de Sodio Soluble (PSS), Salinidad Efectiva (SE) y Salinidad Potencial (SP), además de otros índices como Relación de Kelly's (RK), Relación de Adsorción de Magnesio (RAM), Carbonato de Sodio Residual (CSR) y Potencial Osmótico, basados en ecuaciones estándar de acuerdo con la concentración de aniones y cationes presentes en el agua (**Tabla 3.6**), en conjunto aportan una visión más amplia de la calidad agrícola del agua.

**TABLA 3.6.- ECUACIONES ESTÁNDAR UTILIZADAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD AGRONÓMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.**

ÍNDICE	ECUACIÓN	REFERENCIA
RAS	$\frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$	(Richards, 1954)

ÍNDICE	ECUACIÓN	REFERENCIA
%Na	$\frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$	(Wilcox, 1948)
PSS	$\frac{Na^+ \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+}$	(Wilcox, 1955)
SE	<p>Si <math>Ca^{2+} &gt; (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})</math>, entonces</p> $SE = \sum \text{cationes}^* - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ <p>Si <math>Ca^{2+} &gt; (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})</math>; pero</p> $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ , entonces $SE = \sum \text{cationes}^* - Ca^{2+}$ <p>Si <math>Ca^{2+} &gt; (CO_3^{2-} + HCO_3^-)</math>; pero</p> $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ , entonces $SE = \sum \text{cationes}^* - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ <p>Si <math>(Ca^{2+} + Mg^{2+}) &lt; (CO_3^{2-} + HCO_3^-)</math>, entonces</p> $SE = \sum \text{cationes}^* - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$	(Palacios, 1970)
SP	$Cl^- + \frac{1}{2}SO_4^{2-}$	(Palacios, 1970)
RK	$\frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$	(Kelly, 1963)
CSR	$(CO_3 + HCO_3) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$	(Eaton, 1950)
RAM	$\frac{Mg^{2+} \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$	(Raghunath, 1987)
IP	$\frac{(Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}) * 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+}$	(Doneen, 1964)

### 3.2.1. Condición de sodicidad

El sodio, calcio, magnesio tienen a interactuar en un proceso de intercambio catiónico, mientras para el potasio y amonio, presentan mayor resistencia y se mantienen fijos, teniendo como consecuencia un desequilibrio del suelo por la mayoría de cargas negativas (Porta y López-Acevedo, 2010). La presencia del sodio en altas concentraciones afecta la calidad estructural del suelo, llevando a un decaimiento de la permeabilidad y la velocidad de infiltración (Jairo, 2009).

### 3.2.1.1. Relación de adsorción de sodio (RAS)

Los constituyentes inorgánicos del agua para uso agrícola, reacciona con el suelo. Los principales cationes son el calcio, magnesio y sodio, con concentraciones menores de potasio. Los principales aniones son carbonato, bicarbonato, sulfato y cloruro, con florero y nitrato en bajas concentraciones. El peligro de alcalinidad en el agua para uso agrícola, es determinado por las concentraciones absolutas y relativas de cationes. Si la relación del sodio es mayor, el peligro de alcalinidad es alto y en cambio si el calcio y el magnesio son predominantes, el peligro es bajo. La importancia de los constituyentes catiónicos de un agua empleada en el riego en relación a las propiedades físicas y químicas del suelo, fueron reconocidas antes del intercambio catiónico (Richards, 1954).

La relación de adsorción de sodio en el suelo, es una relación de la adsorción del sodio por el suelo, como consecuencia la relación tiene ventajas para el uso del índice del sodio o peligro de alcalinidad del agua. Donde el índice es definido por la ecuación:

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Donde: el sodio (Na), calcio (Ca) y magnesio (Mg); sus concentraciones son representadas en miliequivalentes por litro (meq/L).

#### 3.2.1.1.1. Diagrama para la clasificación del agua de riego

El diagrama para la clasificación de la calidad del agua para uso agrícola es basado en la conductividad eléctrica (C.E.) en micromhos por centímetro y la relación de adsorción de sodio.

Los límites en la Gráfico representan la relación entre los cationes solubles e intercambiables, dando origen a la clasificación. Los límites son empleados

utilizando ecuaciones empíricas (Richards, 1954).

$$\text{Línea\_sup: } S = 43.75 - 8.87 \cdot (\log C);$$

$$\text{Línea\_med: } S = 31.31 - 6.66 \cdot (\log C);$$

$$\text{Línea\_Baj: } S = 18.87 - 4.44 \cdot (\log C);$$

Donde S= relación de adsorción de sodio; C= Conductividad Eléctrica.

Mientras que para la conductividad eléctrica se emplearon los límites establecidos (Tabla 3.7).

**TABLA 3.7.- CLASIFICACIÓN DEL RIESGO DE SALINIDAD EN EL AGUA DE RIEGO.**

RANGO C.E. ( $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C)	CLASIFICACIÓN
<250	Baja
251-750	Media
751-2,250	Alta
2,251-5,000	Muy alta

Obteniendo del índice de SAR y CE, un gráfico (Richards, 1954), que se muestra en la Gráfico 3.1.

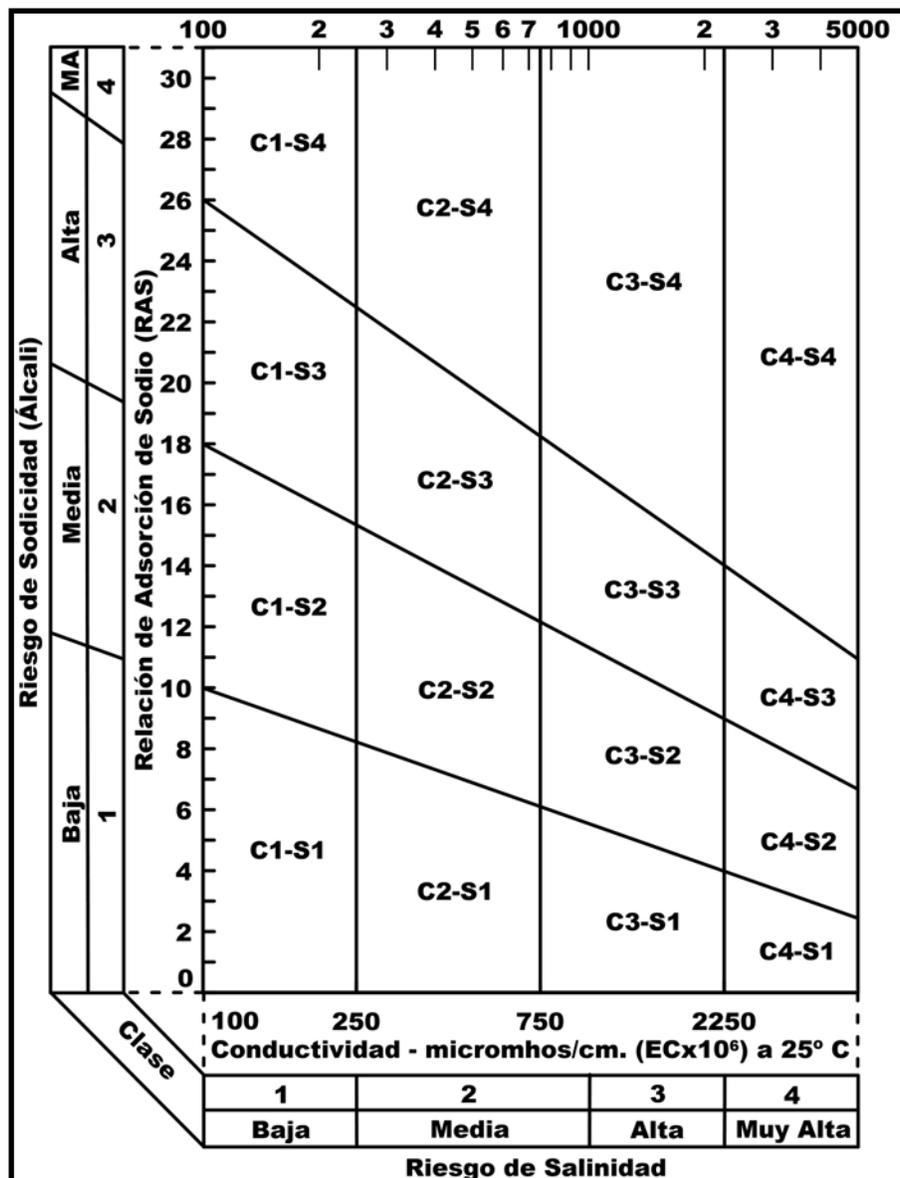


GRÁFICO 3.1.- CLASIFICACIÓN DE SALINIDAD DE ESTADOS UNIDOS DE MANANTIALES Y AGUAS SUBTERRÁNEAS PARA RIEGO (RICHARDS, 1954).

### 3.2.1.2. Porcentaje de sodio (%Na)

El efecto nocivo para el suelo es relacionado a la relación de sodio en el agua de riego con el total de cationes, resultando la concentración de sodio, esta relación es llamada porcentaje de sodio “%Na” y es definida por la siguiente ecuación, la concentración está en meq/L (L. Wilcox, 1955; Wilcox, 1948).

$$\%Na = \frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+}$$

### 3.2.1.2.1. Diagrama de Wilcox (%Na vs CE)

Las características que evalúa, el gráfico de Wilcox son la concentración total o conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio. Para los límites en la CE y porcentaje de sodio son sugeridos (Scofield, 1936), son mostrados en la **Tabla 3.8**. Obtenidos los límites de las dos características a considerar en el gráfico (Wilcox, 1948), con el cual obtenemos una mejor clasificación que al considerar los parámetros por separado. En el gráfico los límites del porcentaje de sodio son representados por líneas curvas y para la conductividad eléctrica por líneas verticales como se muestra en el **Gráfico 3.2**.

**TABLA 3.8.-CLASIFICACIÓN PARA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y PORCENTAJE DE SODIO**

CALIDAD DEL AGUA	RANGO (C.E. X 10 <sup>6</sup> A 25° C)	%Na
Excelente	< 250	< 20
Buena	250 a 750	20 a 40
Permisible	750 a 2,000	40 a 60
Deficiente	2,000 a 3,000	60 a 80
Inadecuada	>3,000	> 80

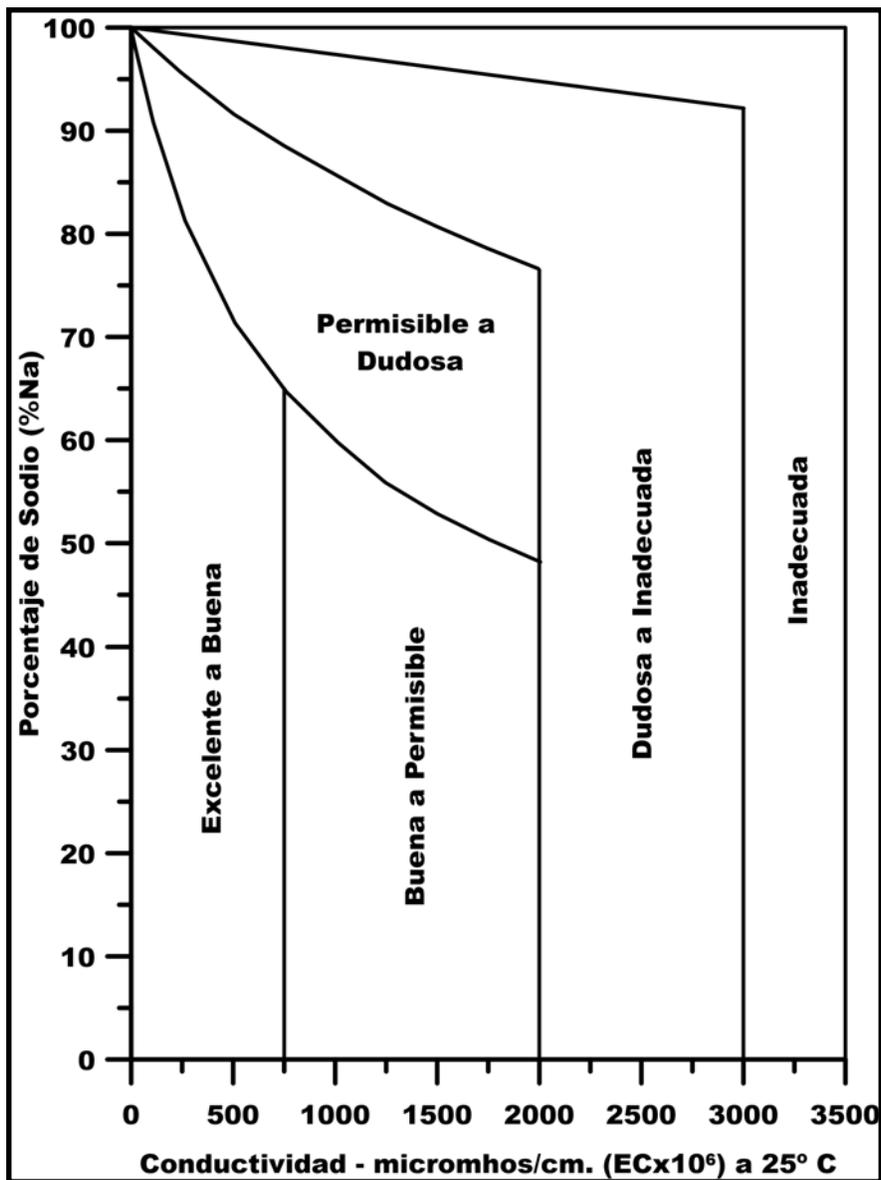


GRÁFICO 3.2.- PORCENTAJE DE SODIO VS CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.

### 3.2.1.3. Porcentaje de sodio soluble (PSS)

El índice de PSS es similar al %Na, es calculado y definido por la siguiente ecuación, donde la concentración de las variables está en meq/L.

$$PSS = \frac{Na^+ \times 100}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+}$$

Es útil para caracterizar el agua, cuando su valor es alto indica un agua blanda y valores bajos indica un agua dura (**Tabla 3.9**). Determina el estado de la irrigación, debido a que merma la permeabilidad del suelo.

**TABLA 3.9.- CLASIFICACIÓN DEL PORCENTAJE DE SODIO SOLUBLE (PSS)**

CALIDAD DEL AGUA	RANGO (%)
Buena	< 50
Mala	> 50

### 3.2.1.4. Relación de Kelly

La RK evalúa el riesgo de alcalinidad en función del sodio con respecto a la concentración de calcio y el magnesio, se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$RK = \frac{Na^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+}}$$

La RK se clasifica de acuerdo a la **Tabla 3.10**

**TABLA 3.10.- CLASIFICACIÓN DE LA RELACIÓN DE KELLEY EN EL AGUA DE RIEGO**

CALIDAD DEL AGUA	RANGO (meq/L)
Buena	< 1
Inadecuada	> 1

### 3.2.1.5. Carbonato de Sodio Residual (CSR)

El índice de CSR evalúa el riesgo de alcalinidad, los elementos a considerar en la muestra de agua son los carbonatos y bicarbonatos, si son mayor a la adición de

calcio y magnesio, es posible que se forme el carbonato de sodio, ocasionando un desplazamiento del sodio al calcio y al magnesio, del intercambio catiónico. Las condiciones que tendera a presentar el suelo son la defloculación (Palacios, 1970).

Se evalúa el índice de CSR mediante la siguiente ecuación

$$CSR = (\text{CO}_3 + \text{HCO}_3) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$$

Para el CSR se clasifica como se muestra en la **Tabla 3.11**.

**TABLA 3.11.- CLASIFICACIÓN DEL CARBONATO DE SODIO RESIDUAL**

CALIDAD DEL AGUA	RANGO (meq/L)
Buena	< 1.25
Deficiente	1.25 a 2.50
Inadecuada	> 2.50

### 3.2.2. Condición de salinidad

Es la relación entre la conductividad del agua de riego y la conductividad de un extracto de suelo saturado. En condiciones de salinidad alta el crecimiento de las plantas es impedida, esta situación se dará cuando exista la presencia alta de sales en el agua de riego. La presencia de concentraciones altas de sales aumenta el potencial osmótico, teniendo como resultado una afectación en el cultivo. En condiciones de salinidad baja el cultivo no se vería afectado (L. V. Wilcox, 1955).

#### 3.2.2.1. Salinidad Efectiva (SE)

Se considera que la SE estima de manera más real el peligro de salinización toda vez que considera las sales solubles del agua de riego que pasan a formar parte del agua del suelo, toma en cuenta la precipitación de las sales menos solubles como son los carbonatos de calcio y magnesio; así como, los sulfatos de calcio

(Barrios, 2014; Mancilla, 2012; Rodríguez, D’Urso, Rodríguez, y Sales, 2008).

El índice de SE se evalúa con la siguiente ecuación

$$\text{Si } Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-} + SO_4^{2-}), \text{ entonces}$$

$$SE = \sum \text{cationes} * - (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-})$$

$$\text{Si } Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-} + SO_4^{2-}); \text{ pero}$$

$$Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-}), \text{ entonces}$$

$$SE = \sum \text{cationes} * -Ca^{2+}$$

$$\text{Si } Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-}); \text{ pero}$$

$$(Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-}), \text{ entonces}$$

$$SE = \sum \text{cationes} * - (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-})$$

$$\text{Si } (Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^{1-}), \text{ entonces}$$

$$SE = \sum \text{cationes} * - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

\* Se deberá de tomar el de mayor concentración, sea cationes o aniones (meq/L).

La clase de una muestra de agua corresponderá a los rangos de la salinidad efectiva mostrados en la **Tabla 3.12** (Palacios, 1970).

**TABLA 3.12.- CLASIFICACIÓN PARA SALINIDAD EFECTIVA DEL AGUA PARA USO AGRÍCOLA**

CALIDAD DEL AGUA	RANGO (meq/L)
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

### 3.2.2.2. Salinidad Potencial (SP)

La SP permite estimar el peligro que pueden generar las sales cuando el contenido de humedad en el suelo es bajo, se considera como uno de los mejores estimadores del efecto de las sales en las plantas (Rodríguez et al., 2008),

considera la precipitación de sales menos solubles como los cloruros y sulfatos (Barrios, 2014; Mancilla, 2012), lo que provoca incrementos en la presión osmótica y reduce la producción agrícola.

El índice de SP se obtiene de acuerdo a la ecuación siguiente

$$SP = Cl^{-} + \frac{1}{2} SO_4^{2-}$$

La clasificación de la calidad de agua para uso agrícola de acuerdo a la salinidad potencial se evalúa de acuerdo a los límites establecidos en la **Tabla 3.13** (Palacios, 1970)

**TABLA 3.13.- CLASIFICACIÓN PARA SALINIDAD POTENCIAL DEL AGUA PARA USO AGRÍCOLA**

CALIDAD DEL AGUA	RANGO (meq/L)
Buena	< 3
Condicionada	3 a 15
No recomendable	> 15

### 3.2.2.2.1. Gráfico de salinidad efectiva y potencial

Para una interpretación en la evaluación de la salinidad efectiva y salinidad potencial se consideraron los dos índices en un Gráfico, tomando los límites establecidos en la Tabla 4.7 y 4.8. Representándolos en el gráfico para salinidad efectiva y potencial (**Tabla 3.14** y **Gráfico 3.3**).

**TABLA 3.14- CLASIFICACIÓN DEL GRÁFICO DE INTERPRETACIÓN PARA SALINIDAD EFECTIVA Y POTENCIAL.**

PARÁMETRO	BUENA	CONDICIONADA	NO RECOMENDABLE
Salinidad Efectiva	E1	E2	E3
Salinidad Potencial	P1	P2	P3

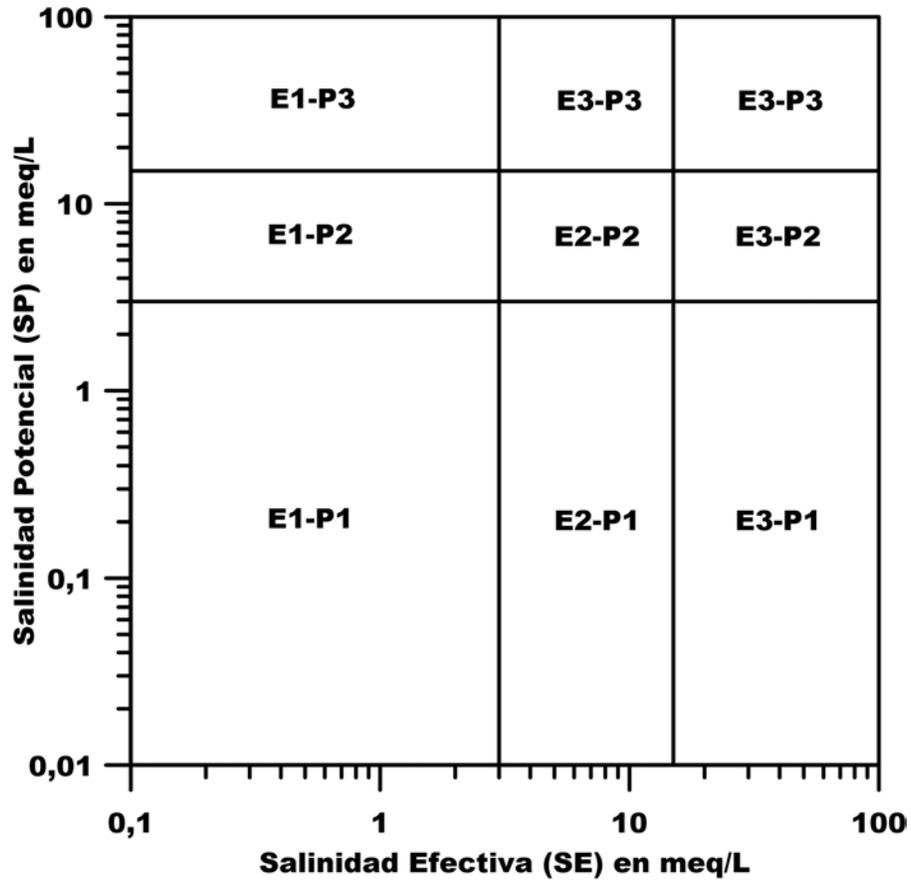


GRÁFICO 3.3.- SALINIDAD POTENCIAL VS SALINIDAD EFECTIVA

### 3.2.2.3. Relación de Adsorción de Magnesio

La RAM evalúa el exceso de magnesio en una muestra de agua, afecta la calidad del suelo, ocasionando un decaimiento en el cultivo.

El índice de RAM se obtiene con la siguiente ecuación

$$\text{RAM} = \frac{\text{Mg}^{2+} \times 100}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}$$

Para la Relación de Adsorción de Magnesio se clasifica de acuerdo a la **Tabla 3.15**.

**TABLA 3.15.- CLASIFICACIÓN DE LA RELACIÓN DE ADSORCIÓN DE MAGNESIO EN EL AGUA DE RIEGO**

CALIDAD DEL AGUA	RANGO (meq/L)
Buena	< 50
Inadecuada	> 50

### 3.2.2.4. Índice de Permeabilidad

La permeabilidad del suelo es afectada por el uso a largo plazo del agua para riego (**Tabla 3.16**). Lo cual es influenciado por el sodio, calcio, magnesio y bicarbonato contenidos en el suelo (Doneen, 1964). Siendo un criterio para la evaluación del agua en la permeabilidad del suelo. Se evalúa con la siguiente ecuación.

$$\text{IP} = \frac{\left( \text{Na}^+ + \sqrt{\text{HCO}_3^-} \right) * 100}{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+}$$

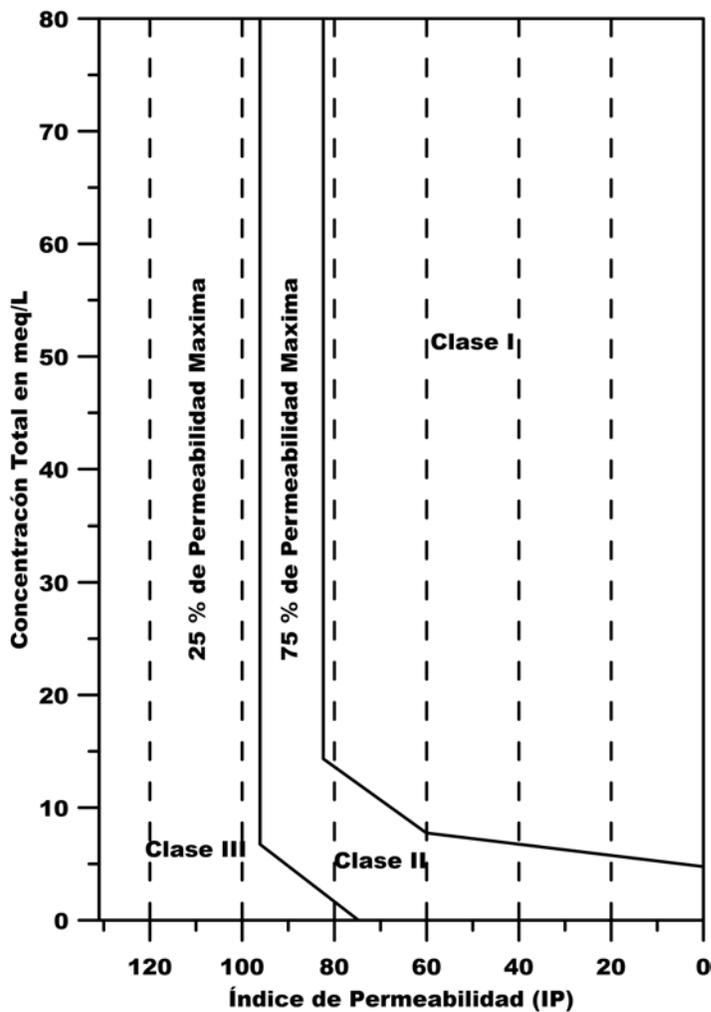
El índice de permeabilidad se clasifica de acuerdo al diagrama de Doneen (Doneen, 1964).

**TABLA 3.16.- CLASIFICACIÓN DEL ÍNDICE DE PERMEABILIDAD**

CLASE DEL AGUA	RANGO
Buena para Riego	>75 %
Buena para Riego	25 a 75 %
Inadecuada para Riego	<25 %

**3.2.2.5. Gráfico de Doneen para el Índice de Permeabilidad.**

La clasificación del Índice de Permeabilidad establecen 3 clases, de las cuales dos son favorables para el riego y una es inadecuada (Tabla 3.16), en la interpretación se apoya en un gráfico (Gráfico 3.4).



**GRÁFICO 3.4.- CLASIFICACIÓN DONEEN (ÍNDICE DE PERMEABILIDAD).**

### 3.3. Metodología para la calidad del agua para uso industrial

El recurso hídrico tiene un gran peso en el desarrollo de la actividad industrial, participando en los procesos de producción. Los límites de calidad del agua aplicable depende de acuerdo a la línea de producción industrial ejerza como textil, hidroeléctrica, manufacturera, etc. El mantener un uso eficiente y óptimo del agua evitara un decaimiento de la producción, corrosión, reacciones químicas y biológicas o contaminación (Authority, 1993). De acuerdo a los procesos se utilizara en la industria de hierro-acero y bebida-alimentos (Authority, 1993).

En la evaluación de la calidad del agua para uso industrial se emplearon para la caracterización del acuífero somero las muestras obtenidas en norias (IPICYT, 2007a; Morán Ramírez, 2009), mientras en el acuífero profundo fue mediante las muestras de agua provenientes de pozos (IPICYT, 2007b).

El proceso para obtener una evaluación de la calidad del agua es generar estadística con los límites permisibles y establecer rangos de aceptación en base a los porcentajes de parámetros aceptables entre el total de parámetros a evaluar, generar una algoritmo aritmético el cual pondere como una clasificación buena o mala calidad para el uso industrial, aquellas muestras donde el numero de parámetros considerado sean buenos, mayores a 80% se considera una muestra de calidad de agua aceptable y las menores al porcentaje serán consideradas como no adecuadas.

#### 3.3.1. Industria de hierro y acero

Se evaluara la calidad del agua en la fabricación de acero mediante la **Tabla 3.17**.

**TABLA 3.17.- DIRECTRICES DE CALIDAD DEL AGUA PARA LA INDUSTRIA DEL HIERRO Y EL ACERO (CONCENTRACIONES EN mg/L A MENOS QUE SE INDIQUE LO CONTRARIO)**

PARÁMETRO	FABRICACIÓN DE ACERO
pH	6.8 - 7.0
Sólidos suspendidos	–

PARÁMETRO	FABRICACIÓN DE ACERO
Sólidos disueltos	–
Sólidos Sedimentables	–
Oxígeno Disuelto	Mínimo para condiciones aeróbicas
Temperatura (°C)	< 38.0
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	< 50.0
Alcalinidad	–
Sulfato	< 175.0
Cloro	< 150.0
Aceite	ND
Material Flotante	ND

### 3.3.2. Industria de las bebidas y alimentos

Para la evaluación de la calidad del agua para la industria de la bebida y alimentos se utilizó las **Tabla 3.18** de límites permisibles (Authority, 1993).

**TABLA 3.18.- CALIDAD DEL AGUA RECOMENDADA PARA LA INDUSTRIA DE BEBIDA Y ALIMENTOS**

PARÁMETRO	COCCIÓN	CERVEZA	BEBIDA CARBONATADA	CONFITERIA	LECHERA	ALIMENTO ENLATADO	PROCESO DEL ALIMENTO	AZUCAR
pH (unidades)	–	6.70-7.0	<6.9	>7.0	–	6.5-8.5	–	–
Color (unidades)	<10.0	<5.0	<10.0	–	ND	<5.0	5.0-10.0	–
Turbiedad (UNT)	<10.0	<10.0	1 – 2	–	–	<5.0	1.0--10.0	–
Olor	Bajo	Bajo	ND	Bajo	ND	ND	Bajo	–
Sólidos suspendidos	–	–	–	50.0-100.00	<500.0	<10.0	–	ND
Sólidos disueltos	–	<800.0	<850.0	50.0-100.00	<500.0	<500.0	<850.0	–
Calcio	NS*	<100.00	–	–	–	<100.0	–	<20.0
Magnesio	–	<30.0	–	–	–	–	–	<10.0
Hierro	<0.2	0.1-1.0	<1.0	<0.2	0.1-0.3	<0.2	<0.2	<1.0

PARÁMETRO	COCCIÓN	CERVEZA	BEBIDA CARBONATADA	CONFITERIA	LECHERA	ALIMENTO ENLATADO	PROCESO DEL ALIMENTO	AZUCAR
Manganeso	<0.2**	<0.1**	<0.05	<0.2**	0.03-0.1	<0.2**	<0.2	<0.1
Cobre	-	-	-	-	ND	-	-	-
Amonio	-	-	-	-	Indicador	<0.5	-	-
Bicarbonato	-	ND	-	-	-	-	-	<100.0
Carbonato	-	<50.0	<5.0	-	-	-	-	-
Sulfato	-	<100.0	<200.0	-	<60.0	<250.00	-	<20.0
Cloro	-	20.0-60.0	<250.0	<250.0	<30.0	<250.0	-	<20.0
Nitrato	-	<10.0	-	-	<20.0	<10.0	-	-
Flúor	-	<1.0	0.2-1.0	-	-	<1.0	<1.0	-
Silicio	-	<50.0	ND	-	-	<50.0	-	-
Dureza (CaCO <sub>3</sub> )	NS*	<70.0	200.0-250.0	-	<180.0	<250.0	10.0-250.0	<100.0
Alcalinidad	-	<85.0	50.0-128.0	-	-	30.0-250.0	30.0-250.0	-
Sulfato de hidrogeno	<0.2	<0.2	<0.2	<0.2	-	-	-	-
Oxigeno consumido	-	-	<15.0	-	-	<1.0	-	-
Extracto tetracloruro de carbono	-	-	Leve	-	<10.0	<0.2	-	-
Extracto de cloroformo	-	-	<0.2	-	-	-	-	-
Acidez	-	-	-	-	-	ND	-	-
Fenol	-	ND	ND	-	-	ND	-	ND
Nitrato	-	-	-	-	-	ND	-	-
Materia organica	-	Indicador	Indicador	-	-	-	-	Indicador

### 3.4. Metodología para la Vulnerabilidad del Agua subterránea

Una de las principales ramas de investigación que han surgido por la situación actual es la hidrogeología. Dentro de tal disciplina, se ha puesto especial atención a la interacción entre el agua y los contaminantes. Es así como (Margat, 1968) introduce el término de “vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación”, donde busca determinar por medio de una representación cartográfica qué tan propensa es una zona de agua subterránea a ser contaminada por medio de una representación cartográfica, donde herramientas de la geomática, así como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), juegan un papel fundamental al momento de representar los resultados.

A partir de ello, muchas son las metodologías que se crean para la determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a ser contaminado. Se pueden destacar DRASTIC (Aller et al., 1987), SINTACS (Civita, 1990), GOD (Foster y Hirata, 1988). Cada una de ellas presenta sus ventajas y desventajas de aplicación, dependiendo de la perspectiva de estudio que se tome, ya sea definiendo vulnerabilidad intrínseca la cual se basa en el hecho de que el entorno físico ofrece un nivel específico de protección a los acuíferos, dependiendo principalmente de las condiciones hidrogeológicas y geomorfológicas de la zona, mientras que la vulnerabilidad específica considera, además, las propiedades de un contaminante en particular, determinando el resultado necesitado la metodología a desarrollar.

El método elegido para el estudio es DRASTIC (Aller et al., 1987), siendo un acrónimo de las siglas en inglés: D (Depth to water), R (Recharge “net”), A (Aquifer media), S (Soil media), T (Topography “Slope”), I (Impact of the vadose zone) y C (Conductivity “Hydraulic” of the aquifer) (**Tabla 3.19**). Cada una de estas variables son ponderadas y procesada en el álgebra de mapas dentro de Qgis, para obtener así una serie de capas, que posteriormente son tratadas y culminar con una

cartografía temática que muestra las zonas más vulnerables a ser contaminadas. Las variables utilizadas son las siguientes:

**TABLA 3.19.- PARÁMETROS EN EL MÉTODO DRASTIC**

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
D	Profundidad del nivel estático
R	Recarga neta
A	Medio acuífero
S	Tipo de suelo
T	Gradiente topográfico
I	Impacto a la zona vadosa
C	Conductividad hidráulica

Una vez obtenidos los parámetros serán empleados en la siguiente ecuación:

$$D_r D_w + R_r R_w + A_r A_w + S_r S_w + T_r T_w + I_r I_w + C_r C_w = V_i$$

Donde el subíndice “r” es para el valor del parámetro obtenido, “w” es el valor de ponderación y  $V_i$  es el índice DRASTIC de la vulnerabilidad acuífera.

### 3.4.1. Peso del parámetro

El factor con el que es evaluado el parámetro, es asignado de acuerdo a la jerarquía en comparación a los demás. Derivado de ello el método DRASTIC tiene ponderaciones para cada parámetro (**Tabla 3.20**)(Aller et al., 1987).

**TABLA 3.20.- PONDERACIONES ASIGNADAS A LOS PARÁMETROS DE DRASTIC**

PARÁMETRO	PONDERACIÓN
Profundidad del nivel estático “D <sub>w</sub> ”	5
Recarga neta “R <sub>w</sub> ”	4
Medio acuífero “A <sub>w</sub> ”	3
Tipo de suelo “S <sub>w</sub> ”	2

PARÁMETRO	PONDERACIÓN
Gradiente topográfico "T <sub>w</sub> "	1
Impacto a la zona vadosa "I <sub>w</sub> "	5
Conductividad hidráulica "C <sub>w</sub> "	3

### 3.4.2. Rango de ponderación

El parámetro está dividido en rangos, según el peligro potencial de contaminación. Los rangos varían de acuerdo al parámetro a considerar. Derivado de la metodología estos pesos son constantes y no se pueden modificar (Aller et al., 1987).

### 3.4.3. Profundidad del nivel estático (D)

Se define como la distancia en metros desde el nivel de terreno hasta el cuerpo del agua subterránea. Donde la ponderación más significativa es con un valor de 10 y la menos significativa es de 1, para este se utilizó criterios de distancia modificados (Ramos Leal, 2002)(**Tabla 3.21**). Los niveles estáticos en el acuífero somero serán obtenidos con los NE de norias (CONAGUA, 2014c) y el acuífero medio-profundo con los NE de pozos (CONAGUA, 2014c). Con los cuales se elaborara estadística y dar la ponderación pertinente, después se hará una representación espacial de la distribución con el software Surfer.

**TABLA 3.21.- CLASIFICACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DEL NIVEL ESTÁTICO ( D<sub>w</sub>= 5 )**

DISTANCIA (Ft)	DISTANCIA (m)	DIST. MOD (m)	PONDERACIÓN "D <sub>r</sub> "
0-5	0-1.5	0 - 7.5	10
5-15	1.5-4.6	7.5 - 23	9
15-30	4.6-9.1	23 - 45.5	7
30-50	9.1-15.2	45.5 - 76	5
50-75	15.2-22.9	76 - 114.5	3
75-100	22.9-30.5	114.5 - 152.5	2

DISTANCIA (Ft)	DISTANCIA (m)	DIST. MOD (m)	PONDERACIÓN "D <sub>r</sub> "
>100	> 30.5	> 152.5	1

### 3.4.4. Recarga neta (R)

Es la cantidad total de agua en milímetros que se infiltra desde la superficie del terreno hasta el subsuelo en un año. Los rangos y ponderación se muestran en la **Tabla 3.22**. Los datos de recarga neta se calcularán con la estimación de la precipitación y evapotranspiración de las estaciones climatológicas del servicio meteorológico nacional (CONAGUA, 2015), además de complementarlo con la recarga inducida producto del retorno de riego y las fugas del sistema de distribución de agua potable (CONAGUA, 2009), con los parámetros mencionados se obtendrá un mapa distribución que se considerara en los dos acuíferos, mediante el software Grass Gis 7.0 y Surfer.

**TABLA 3.22.- CLASIFICACIÓN DE RECARGA NETA ( R<sub>w</sub>= 4 )**

INFILTRACIÓN (in)	INFILTRACIÓN (mm)	PONDERACIÓN "R <sub>r</sub> "
0-2	50	1
2-4	50-100	3
4-7	100-178	6
7-10	178-254	8
>100	>254	9

### 3.4.5. Medio acuífero (A)

Se refiere a la clasificación por medio de la formación litológica del acuífero. Dado que las variables en este caso no son numéricas, se les asignó un valor en correspondencia con la **Tabla 3.23**. Se caracteriza este parámetro en el acuífero somero con la geología local de la zona de estudio (G. Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992; Ramos-Leal et al., 2007), la descripción litológica de pozos

presentes en el VSLP (Castillo-Cruz, 2003), después clasificar de acuerdo a la litología y asignar su ponderación.

**TABLA 3.23.- CLASIFICACIÓN DEL MEDIO ACUÍFERO (  $A_w= 3$  )**

LITOLOGÍA	PONDERACIÓN “A <sub>r</sub> ”	PONDERACIÓN “A <sub>r</sub> ”
Lutita masiva	1-3	2
Ígnea / metamorfica	2-5	3
Ígnea / metamorfica alterada	3-5	4
Arenisca estratificada, caliza, lutita	5-9	6
Arenisca masiva	4-9	6
Caliza masiva	4-9	6
Arena y grava	4-9	8
Basaltos	2-10	9
Caliza Karstica	9-10	10

### 3.4.6. Tipo de suelo (S)

Es el tipo de suelo más superficial, es decir la descripción de su edafología. Al igual que el parámetro anterior, los valores numéricos fueron dados a partir de las características del tipo de material que conforma el área de estudio. Los valores se observan en la **Tabla 3.24**.

**TABLA 3.24.- CLASIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO (  $S_w= 2$  )**

SUELO	PONDERACIÓN “S <sub>r</sub> ”
Fino o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Turba	8
Agregado aciloso o comprimido	7
franco arenoso	6
Marga	5

SUELO	PONDERACIÓN "S <sub>r</sub> "
Franco limoso	4
Franco arcilloso	3
Suelo orgánico	2
Arcillas no agregadas y material no compacto	1

### 3.4.7. Gradiente topográfico (T)

Es la variabilidad en la pendiente de la superficie terrestre expresada en grados con respecto a la horizontal. El nivel de la pendiente va determinar la cantidad de la escorrentía de los posibles contaminantes y su tiempo de infiltración. De acuerdo a los valores obtenidos se clasificó en relación a la **Tabla 3.25**. Se obtendrá a través de un modelo digital de elevación SRTM, y procesamiento con el software Grass Gis 7.0, obteniendo un mapa de pendientes, y su reclasificación con los rangos de las ponderaciones para el parámetro.

**TABLA 3.25.- CLASIFICACIÓN PARA EL GRADIENTE TOPOGRÁFICO ( T<sub>w</sub>= 1 )**

PENDIENTE (%)	PONDERACIÓN "T <sub>r</sub> "
0-2	10
2-6	9
6-12	5
12-18	3
>18	1

### 3.4.8. Impacto a la zona vadosa (I)

Corresponde al material de la zona no saturada, se refiere a la características del material geológico existente por encima del medio acuífero. Para este caso se obtuvo por medio de las características litológicas del valle a partir de cartografía 1:250000 del INEGI, información de la columna litológica del censo de pozos (Castillo-Cruz, 2003). La valoración y clasificación se resumen en la **Tabla 3.26**.

**TABLA 3.26.- CLASIFICACIÓN DEL IMPACTO A LA ZONA VADOSA (  $I_w= 5$  )**

LITOLÓGÍA	PONDERACIÓN “ $I_r$ ”	PONDERACIÓN TÍPICA “ $I_r$ ”
Limo / arcilla	1-2	1
Esquistos	2-5	3
Caliza	2-7	6
Arenisca	4-8	6
Caliza, arenisca y arcilla	4-8	6
Arenas y gravas con limos y arcillas	4-8	6
Ígnea / metamorfica	2-8	4
Arena y grava	6-9	8
Basalto	2-10	9
Caliza kárstica	8-10	10

### 3.4.9. Conductividad hidráulica (C)

Representa la velocidad del agua al transitar por un medio poroso y está dada en metros por día. Para obtener información se puede emplear pruebas de bombeo, aunque en el caso de estudio aplicado no se contó con esa información y se emplearon valores teóricos de acuerdo a su litología. Para clasificar este parámetro se siguió los límites de la **Tabla 3.27**.

**TABLA 3.27.- CLASIFICACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (  $C_w= 3$  )**

GPD/Ft <sup>2</sup>	m/Día	cm/s	PONDERACIÓN “ $C_r$ ”
1-100	0.04-4.08	$4.6 \times 10^{-5}$ - $4.7 \times 10^{-3}$	1
100-300	4.08-12.22	$4.7 \times 10^{-3}$ - $1.4 \times 10^{-2}$	2
300-700	12.22-28.55	$1.4 \times 10^{-2}$ - $3.4 \times 10^{-2}$	4
700-1000	28.55-40.75	$3.4 \times 10^{-2}$ - $4.7 \times 10^{-2}$	6
1000-2000	40.75-81.49	$4.7 \times 10^{-2}$ - $9.5 \times 10^{-2}$	8
> 2000	> 81.49	> $9.5 \times 10^{-2}$	10

Una vez obtenido los parámetros dados tanto por el peso “w” y las ponderaciones asignadas “r”, se obtiene mediante la ecuación del índice de vulnerabilidad acuífera por medio del método DRASTIC, se puede representar mediante un mapa con escala de color propuesta en la misma metodología (**Tabla 3.28**). Cuando la vulnerabilidad acuífera “ $V_i$ ” aumente mayor será su grado de contaminación.

**TABLA 3.28.- ESCALA DE COLOR UTILIZADA EL ÍNDICE DRASTIC (ALLER ET AL., 1987)**

ESCALA DE COLOR	DESCRIPCIÓN “ $V_i$ ”
Violeta	<79
Indigo	80 a 99
Azul	100 a 119
Verde oscuro	120 a 139
Verde claro	140 a 159
Amarillo	160 a 179
Naranja	180 a 199
Rojo	>200

## 4. Resultados

### 4.1. Evaluación de la calidad del agua para consumo humano

#### 4.1.1. Norma oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994

##### 4.1.1.1. Límites permisibles de características microbiológicas

El análisis microbiológico para el sistema acuífero del VSLP, muestra que en el acuífero colgado, los organismos coliformes tanto totales como fecales tienen una presencia fuera de la NOM-127-SSA1-1994, que van del 97.87% para organismos coliformes totales y de 95.74% para organismos coliformes fecales, mientras que para el acuífero medio-profundo no se cuenta con datos (**Tabla 4.1**).

**TABLA 4.1.- MUESTRAS QUE ESTÁN FUERA DEL LÍMITE PERMISIBLE EN LA NOM-127-SSA1-1994, PARA EL CONTENIDO DE ORGANISMOS.**

Característica	Limite Permissible	Acuífero colgado	Acuífero med-prof
Organismos coliformes totales	Ausencia o no detectables	97.87%	-
Organismos coliformes fecales	Ausencia o no detectables	95.74%	-

##### 4.1.1.2. Límites permisibles de características químicas

El contenido de constituyentes químicos deberá ajustarse a lo establecido (**Tabla 4.2**). Los límites se expresan en mg/L, excepto cuando se indique otra unidad.

Los resultados en el acuífero colgado presentaron siete características (manganeso, nitratos, nitritos, pH, sodio, sólidos disueltos totales, sulfatos y sustancias activas al azul de metileno) que rebasaron la NOM-127-SSA1-1994 (**Tabla 4.2**); en tanto el acuífero medio-profundo los fluoruros, pH y una muestra de nitratos (**Tabla 4.2**), fueron las características que excedieron los límites permisibles.

**TABLA 4.2.- MUESTRAS QUE PRESENTAN CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y ORGANOLÉPTICAS FUERA DE LOS LIMITES PERMISIBLES.**

Característica	Limite Permissible	Acuífero colgado	Acuífero med-prof
Cloruros (como Cl-)	250.00	0%	0%
Fierro	0.30	0%	-
Fluoruros (como F-)	1.50	0%	26%
Manganeso	0.15	10.63%	-
Nitratos (como N)	10.00	57.44%	2%
Nitritos (como N)	1.00	2.13%	-
pH (potencial de hidrógeno)	6.5-8.5	63.83%	16%
Sodio	200.00	2.13%	0%
Sólidos disueltos totales	1000.00	12	0%
Sulfatos (como SO4=)	400.00	25.53%	0%
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50	51.06%	-

#### 4.1.2. Índice de calidad del agua subterránea (ICA)

La calidad del agua para consumo humano de acuerdo al ICA, se encuentra deteriorada en el acuífero somero de San Luis Potosí. Donde las muestras tienen una clasificación que va de excesiva contaminación a contaminada del 91.49 % y por otro lado contamos con clasificaciones que van de levemente contaminada a excelente de 8.51 %, (**Tabla 4.3**). Las zona menos afectada se encuentra al sur de la ciudad en donde se ubica la zona de recarga de la Sierra de San Miguelito, las más contaminadas son la zona industrial, agrícola de Soledad de Graciano Sánchez y parte central de la zona urbana con una clasificación de agua no apta para el consumo humano (**Figura 4.1a**). La contaminación corresponde a un origen antropogénico, el cual es provocado por el cambio de uso de suelo a través de la historia de crecimiento de la ciudad de San Luis Potosí (López-Álvarez et al., 2014).

En el acuífero medio-profundo la calidad del agua para consumo humano, cuenta con un mayor porcentaje de muestras, con clasificaciones de excelente a levemente contaminada con un 96.00 % y de contaminada a excesivamente contaminada con un 4.00 % (**Tabla 4.3**). La zona con menor calidad se encuentra en una franja que va de Sierra de San Miguelito, zona industrial y Soledad de G S (**Figura 4.1b**).

El acuífero colgado tiene una menor calidad de agua para consumo humano con respecto al acuífero medio-profundo (**Figura 4.1**). El origen de la contaminación que da lugar a la mala calidad del agua para el acuífero colgado es antropogénico; en tanto que, para el acuífero medio-profundo la contaminación es de origen natural.

**TABLA 4.3.- CLASIFICACIÓN DEL AGUA SEGÚN EL ÍNDICE DEL ICA, EN EL ACUÍFERO COLGADO Y EL ACUÍFERO MEDIO-PROFUNDO.**

Clasificación	Rango ICA	Uso	Ac. colgado muestras	Ac. med-prof muestras
Excesivamente contaminada	0-39	Inaceptable para su consumo	53.19%	0%
Fuertemente Contaminada	40-49	Dudoso para su consumo	34.05%	0%
Contaminada	50-69	Tratamiento de potabilización indispensable	4.25%	6.00%
Levemente contaminada	70-79	Dudoso su consumo sin purificación	6.38%	34.00%
Aceptable	80-89	Requiere purificación menor	2.13%	52.00%
Excelente	90-100	No requiere purificación para su consumo	0%	8.00%

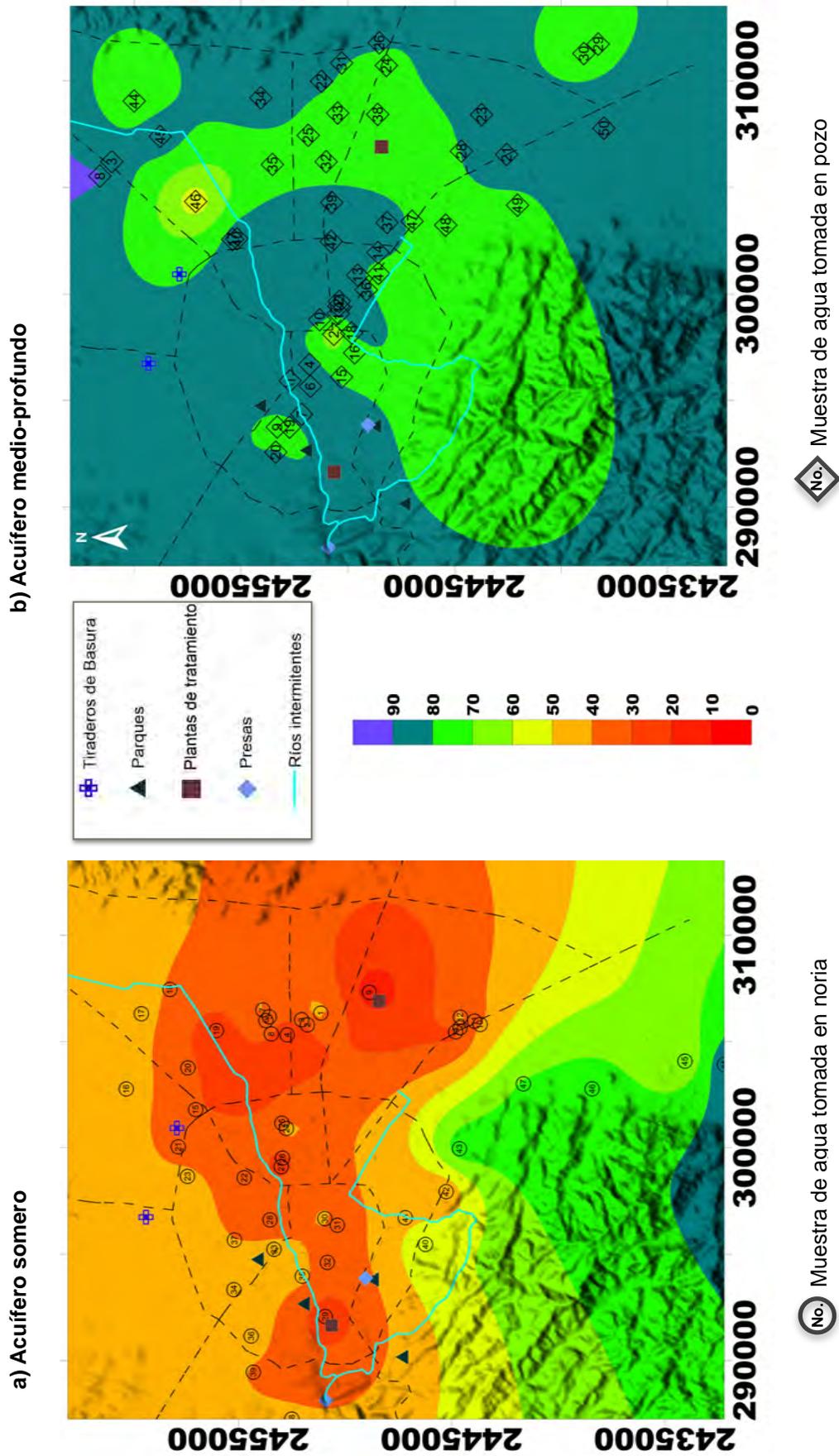


FIGURA 4.1.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AGUA (ICA).

### 4.1.3. Índice de contaminación (ICON)

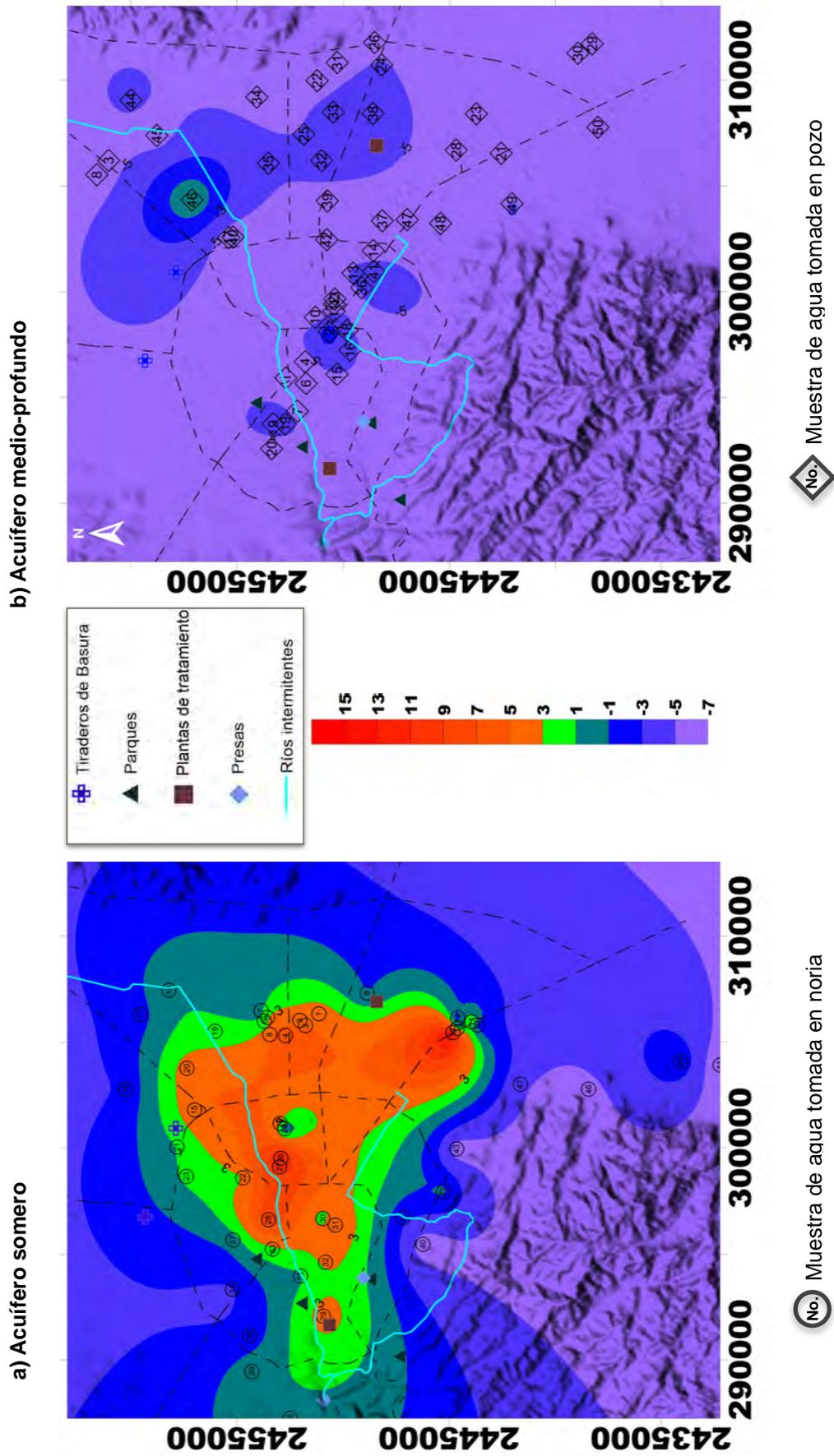
La clasificación del ICON en el acuífero colgado con valores negativos se distribuyen en zonas cercanas a la Sierra de San Miguelito que es la menos contaminada, mientras los valores positivos correspondientes a contaminación se sitúan en la zona agrícola y zona urbana, la cual es de tipo orgánico. En la zona industrial se registró el mayor índice positivo debido a la presencia de metales; principalmente la presencia del Mn (**Figura 4.2a**).

Los valores del ICON calculados para el acuífero medio-profundo, son negativos lo cual indica que no tiene problemas de contaminación (**Figura 4.2b**); sin embargo, en la mayoría de los pozos se tiene problemas con el flúor.

Los resultados del ICON en el acuífero colgado y el acuífero medio-profundo, muestran un mayor grado de contaminación en el acuífero colgado debido a que un 36.17 % de las muestras, están clasificadas con contaminación alta, en comparación al acuífero medio-profundo que no presenta ninguna muestra con contaminación alta (**Tabla 4.4**). Por lo tanto, estos resultados son congruentes con los de ICA.

**TABLA 4.4.- CLASIFICACIÓN DEL AGUA SEGÚN EL ÍNDICE DEL ICON, EN EL ACUÍFERO COLGADO Y EL ACUÍFERO MEDIO-PROFUNDO.**

Contaminación	Rango ICON	Ac. colgado muestras	Ac. med-prof muestras
Baja	$\leq 1$	48.94%	98.00%
Media	1-3	14.89%	2.00%
Alta	$\geq 3$	36.17%	0%



## 4.2. Evaluación de la calidad del agua para uso agrícola

Los resultados para la evaluación de la calidad del agua para uso agrícola, tuvieron los criterios adecuados, para las condiciones de sodicidad y salinidad, en el gráfico de SAR vs CE, %Na vs CE, SP vs SE e IP.

### 4.2.1. Clasificación del agua en base al diagrama de Wilcox

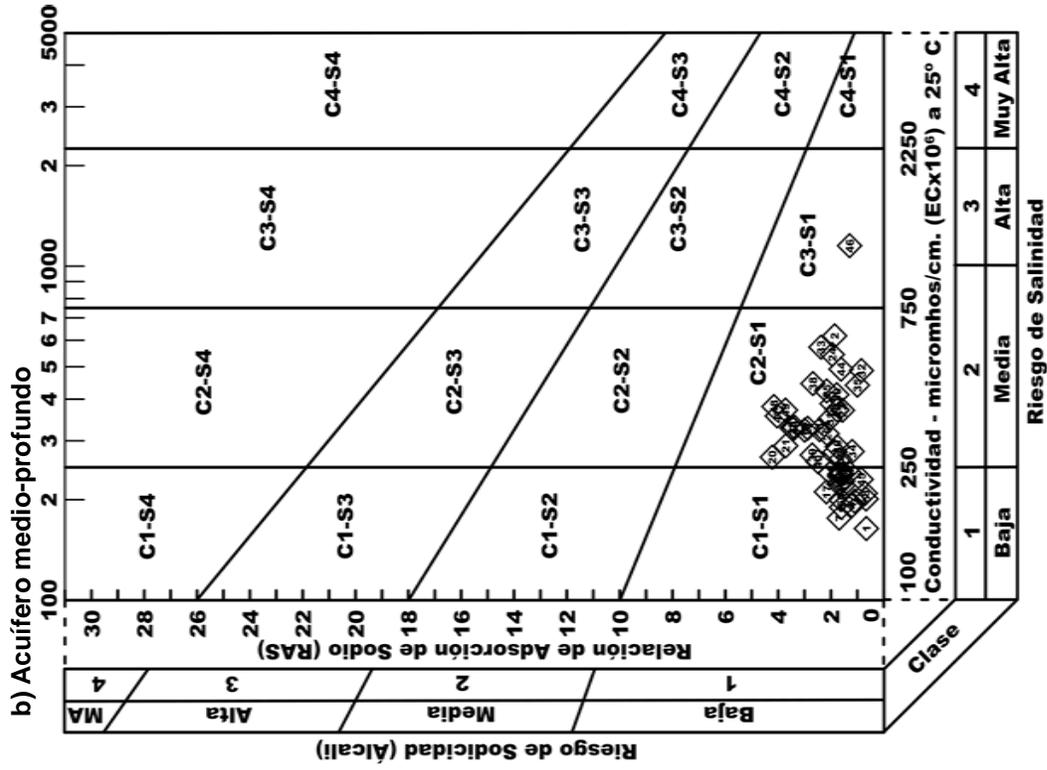
El diagrama de Wilcox clasifica de acuerdo al riesgo de salinización y sodificación en la muestra, por medio de parámetros como lo son CE y RAS. Para el sistema hidrogeológico se analizó el acuífero colgado (**Gráfico 4.1a**), se observa tres clasificaciones predominantes que son C1-S1 correspondiente a baja salinidad y sodicidad baja, C1-S2 baja salinidad y sodicidad media y por C1-S3 baja salinidad y sodicidad alta, en este grupo se obtuvo una mayor densidad de muestras que pertenecen a esa clasificación.

Para el acuífero medio-profundo (**Gráfico 4.1b**) tiene tres clasificaciones la C1-S1 correspondiente a baja salinidad y sodicidad baja, C1-S2 baja salinidad y sodicidad media y C1-S3 baja salinidad y sodicidad alta, en este caso se observó que el grupo con mayor cantidad de muestras clasificadas es C2-S2, posteriormente el grupo de C1-S1 y por último con una muestra la clase de C1-S3. La distribución espacial de las muestras del acuífero colgado (**Figura 4.3a**) para RAS, tiene una clasificación de baja sodicidad.

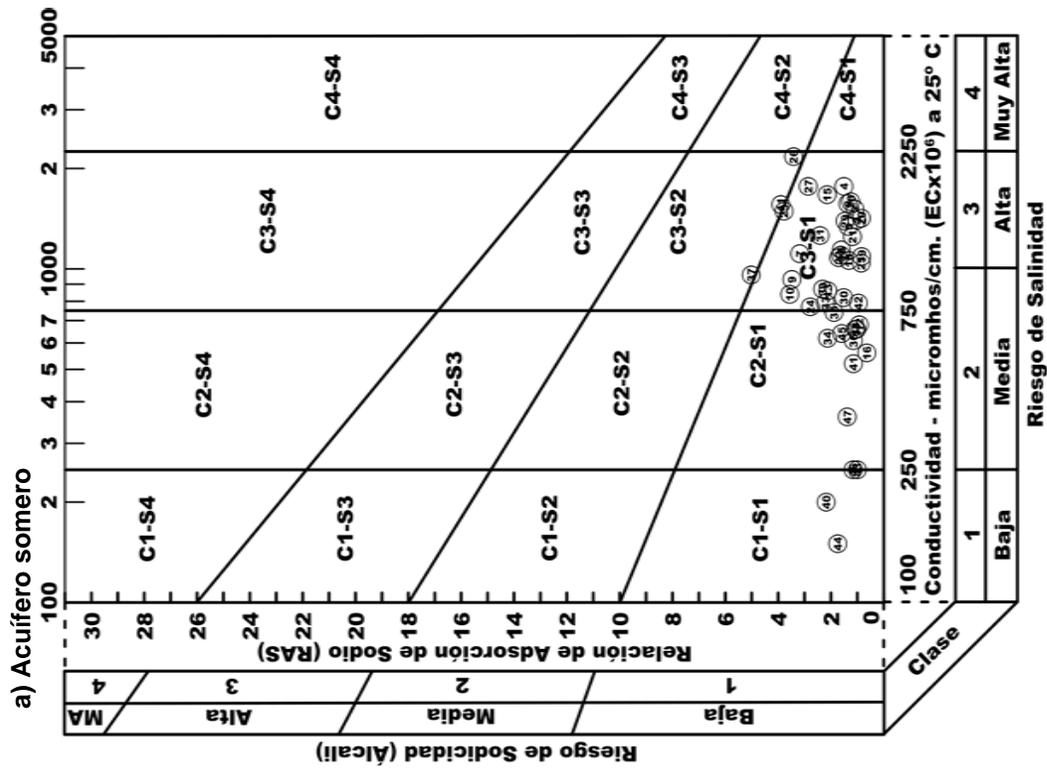
En el acuífero medio-profundo la distribución espacial del índice RAS (**Figura 4.3b**), presenta un bajo riesgo de sodicidad.

### 4.2.2. Porcentaje de sodio (%Na)

Para el acuífero colgado, el muestreo de la zona tiene tres clasificaciones, dos de ellas mayoritarias que son la de buena a excelente y permisible a buena, donde la tercer clasificación únicamente cuenta con una muestra y es clasificada como inadecuada a dudosa, lo que se relaciona con el RAS (**Gráfico 4.2a**) en donde se



⬠ No. Muestra de agua tomada en pozo



○ No. Muestra de agua tomada en noria

GRÁFICO 4.1.- DIAGRAMA DE RELACIÓN DE ADSORCIÓN DE SODIO Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

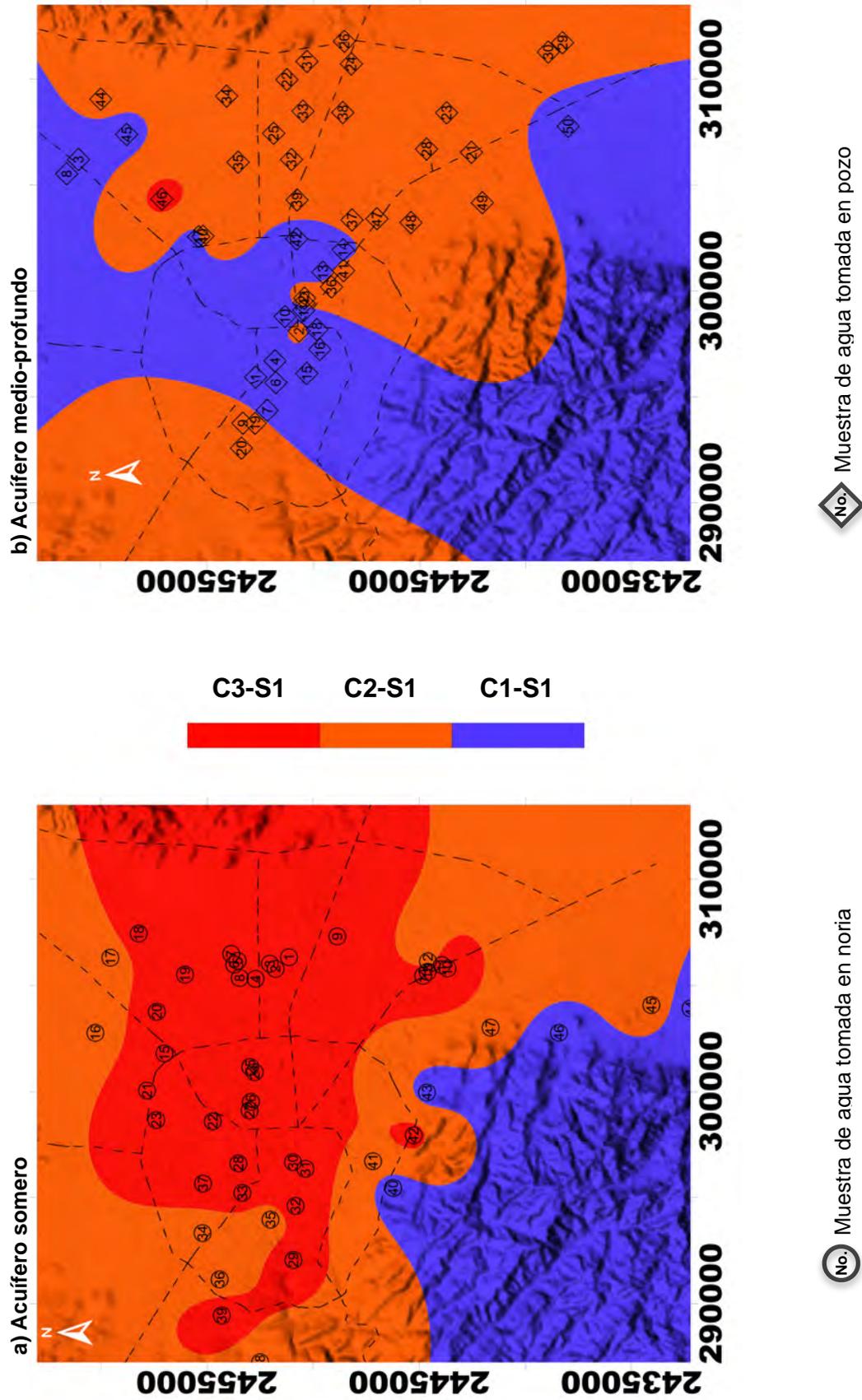


FIGURA 4.3.- MAPAS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CLASIFICACIÓN DEL DIAGRAMA DE WILCOX (RAS VS CE).

clasificaban con riesgo bajo.

En el acuífero profundo (**Gráfico 4.2b**) tenemos una clasificación dominante de buena a excelente y solamente una muestra con calidad permisible a buena de acuerdo a los límites del diagrama.

Con respecto a la distribución espacial el acuífero colgado (**Figura 4.4a**), se tienen tres puntos anómalos sin rebasar los límite de %Na, que se sitúan en la zona industrial, en la zona de recarga y en el centro de la ciudad.

La principal clasificación para el acuífero profundo fue de excelente a buena en toda el área, solo una muestra fue de buena a permisible (**Figura 4.4b**).

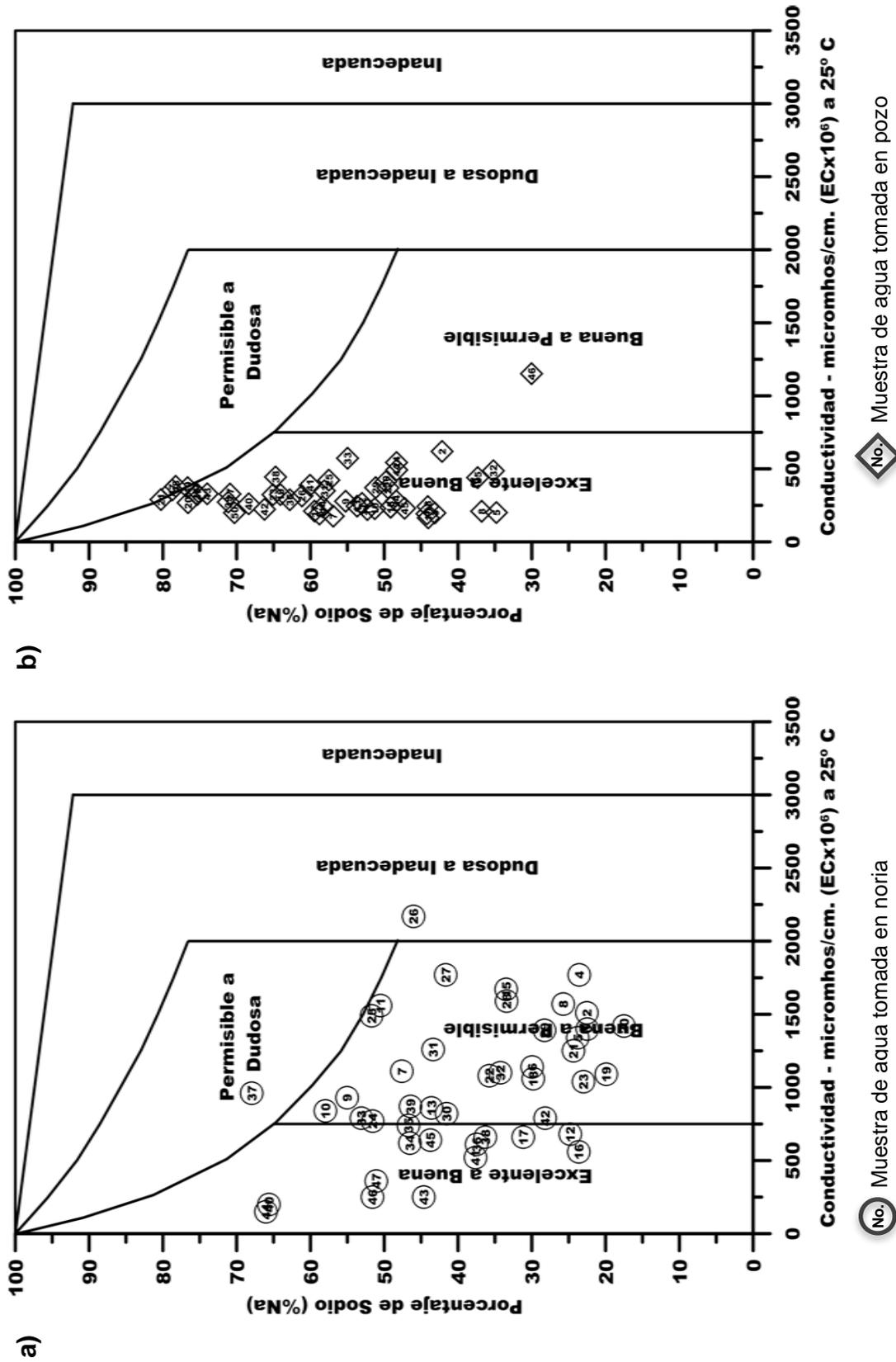
#### 4.2.3. Salinidad Efectiva (SE)

En el acuífero colgado correspondió de buena y condicionada, de la cual la clase condicionada es la que tiene mayor numero de muestras (**Gráfico 4.3a**).

El acuífero medio-profundo tienen una clasificación que va de buena a condicionada para salinidad efectiva, siendo la calidad de agua buena la que cuenta con mayor número de muestras en ese rango, lo que nos dice que el agua empleada para riego, proveniente del acuífero profundo es de buena calidad (**Gráfico 4.3b**).

La salinidad efectiva en el acuífero colgado, se distribuye en una zona condicionada abarcando el centro de la ciudad, incrementándose en la zona agrícola y teniendo una zona con calidad de agua no recomendable para uso agrícola en la zona industrial (**Figura 4.5a**).

Para el acuífero profundo la salinidad efectiva (**Figura 4.5b**) tiene una distribución de 2 muestras de buena calidad en su mayoría y una muestra con calidad de



68 GRÁFICO 4.2.- GRÁFICO DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA VS PORCENTAJE DE SODIO.

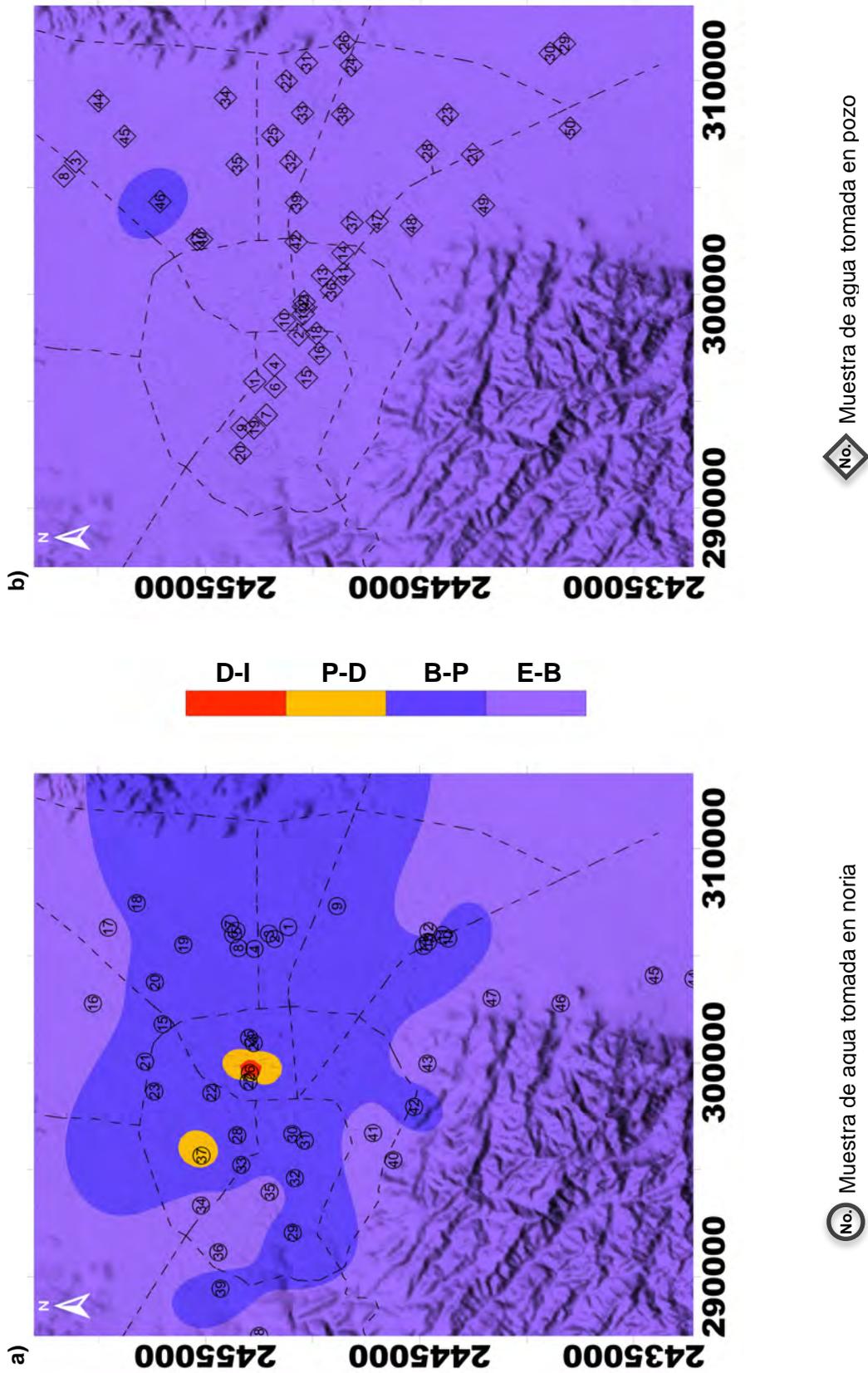


FIGURA 4.4.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE PORCENTAJE DE SODIO (%NA).

agua condicionada hacia el noreste de la ciudad.

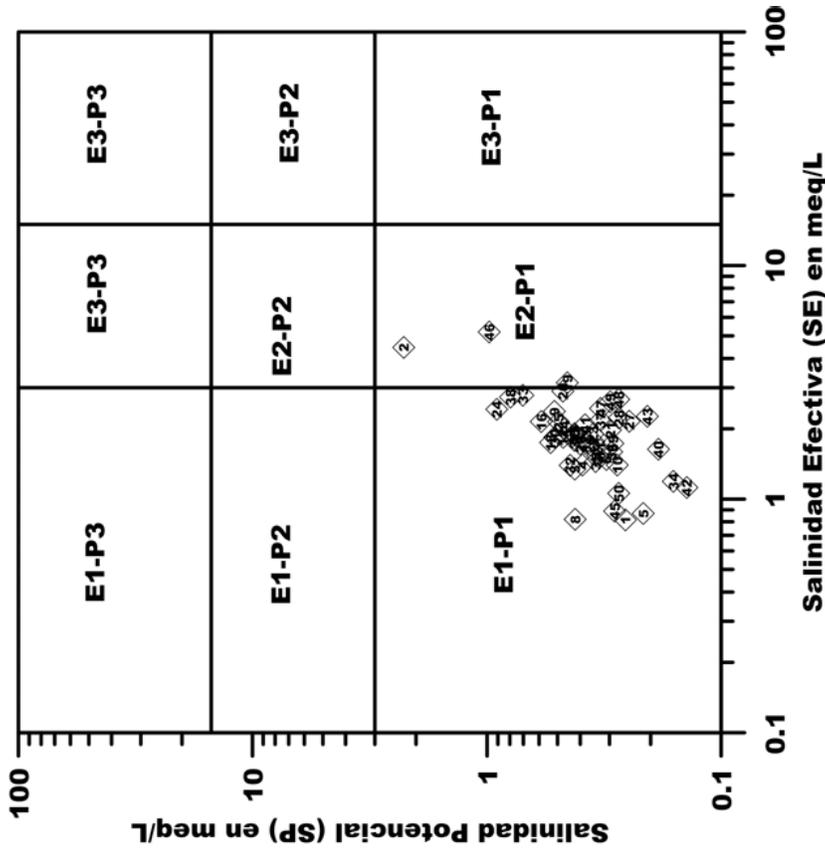
#### 4.2.4. Salinidad Potencial (SP)

En el acuífero colgado se evaluó el índice de salinidad potencial obteniendo muestras con calidad del agua de buena a condicionada, resultando condicionada la mayor cantidad de muestras en el uso agrícola (**Gráfica 4.3a**). Para el acuífero profundo (**Gráfica 4.3b**) tenemos que la salinidad potencial es buena para todo el análisis de muestras, por lo tanto, no se tiene ningún problema con la calidad del agua. En el acuífero colgado (**Figura 4.5c**), su distribución espacial se presenta en el centro de la ciudad y en la zona agrícola, con una calidad de agua condicionada. Lo correspondiente al acuífero profundo (**Figura 4.5d**), cuenta con una calidad buena, en toda la zona de estudio.

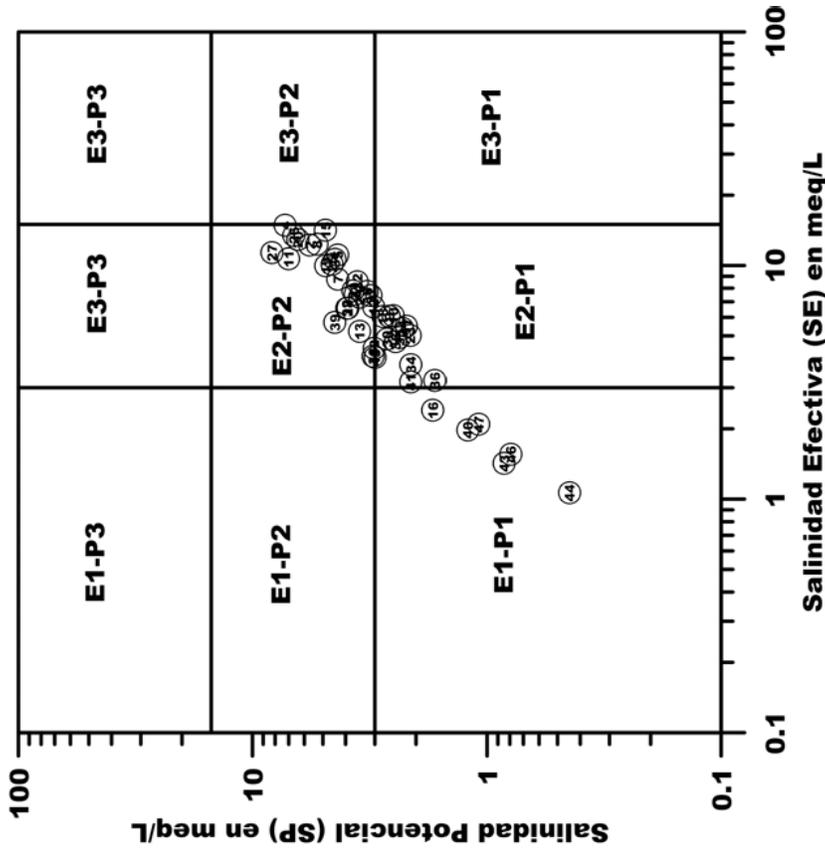
#### 4.2.5. Índices de Permeabilidad (IP), Índice de Relación de Kelley (RK), Relación de Adsorción de Magnesio (RAM) y Porcentaje de Sodio Soluble (PSS)

Para el IP las muestras en el acuífero somero son clasificadas como buenas estando en clase I y II, salvo una muestra que se situó en clase III como no recomendable (**Gráfica 4.4a**) y para el acuífero profundo las muestras en su mayoría corresponden a la clase no recomendable (**Gráfica 4.4b**). El índice de RK muestra una clasificación buena en el acuífero somero mientras que para el acuífero profundo tiene un comportamiento clasificado en buena e inadecuada. Para el RAM los valores altos se presentaron en el acuífero de medio granular, valores intermedios en el acuífero somero y los valores bajos en el acuífero fracturado. En el índice de CSR, presenta valores de clasificación buena en el acuífero somero y para el acuífero profundo va de buena a dudosa. En el PSS, el acuífero somero tiene una mayor presencia de muestras clasificadas como buenas y cinco muestras catalogadas como mala calidad, en el caso del acuífero medio-profundo, muestras una paridad de calidad buena y mala.

b) Acuífero medio-profundo



a) Acuífero somero



◊ No. Muestra de agua tomada en pozo

○ No. Muestra de agua tomada en noria

GRÁFICO 4.3.- EVALUACIÓN DE SALINIDAD POTENCIAL VS SALINIDAD EFECTIVA.

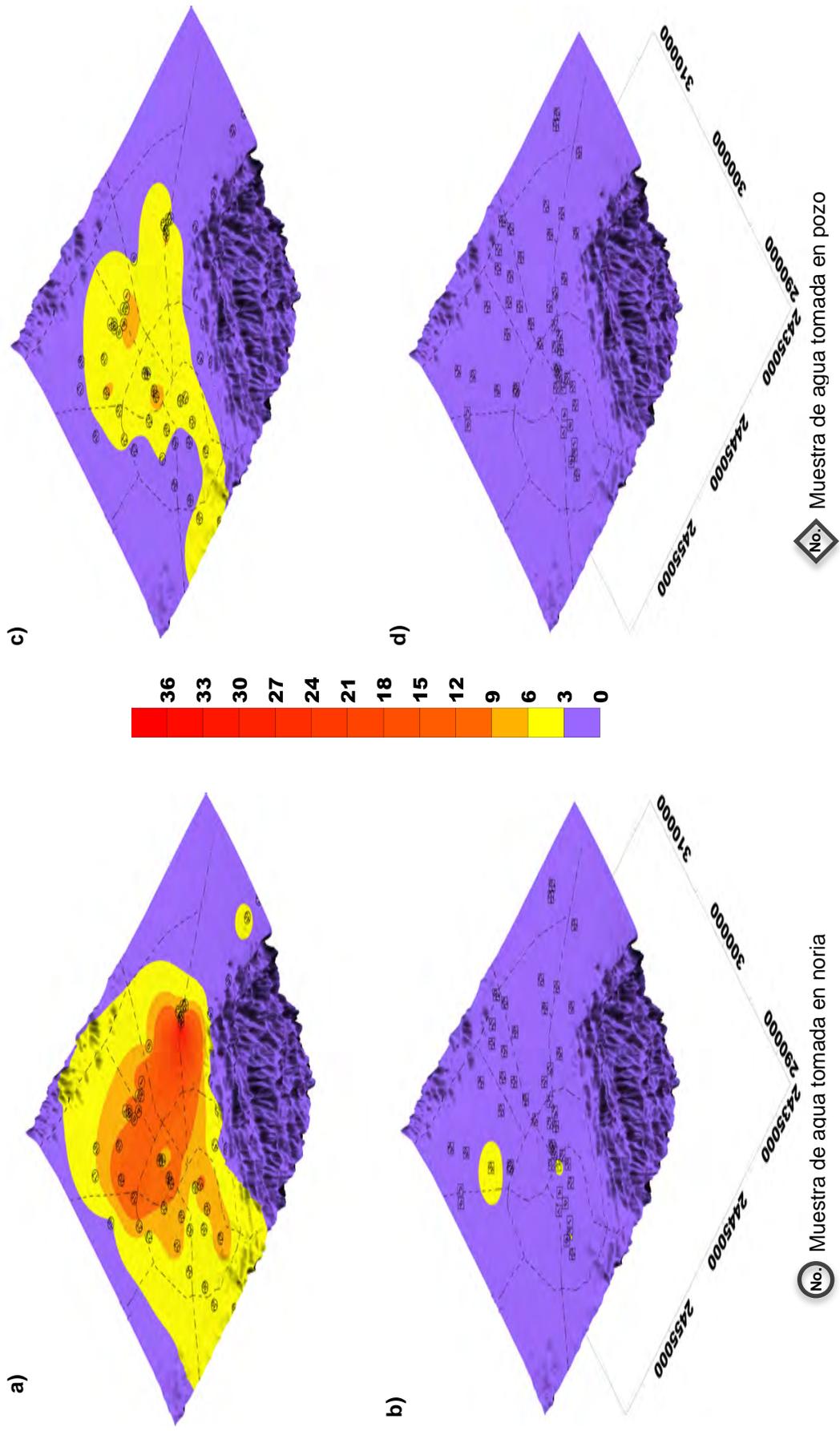


FIGURA 4.5.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE SALINIDAD EFECTIVA, A) ACUÍFERO COLGADO Y B) ACUÍFERO MEDIO-PROFUNDO Y SALINIDAD POTENCIAL C) ACUÍFERO SOMERO Y D) ACUÍFERO MEDIO-PROFUNDO

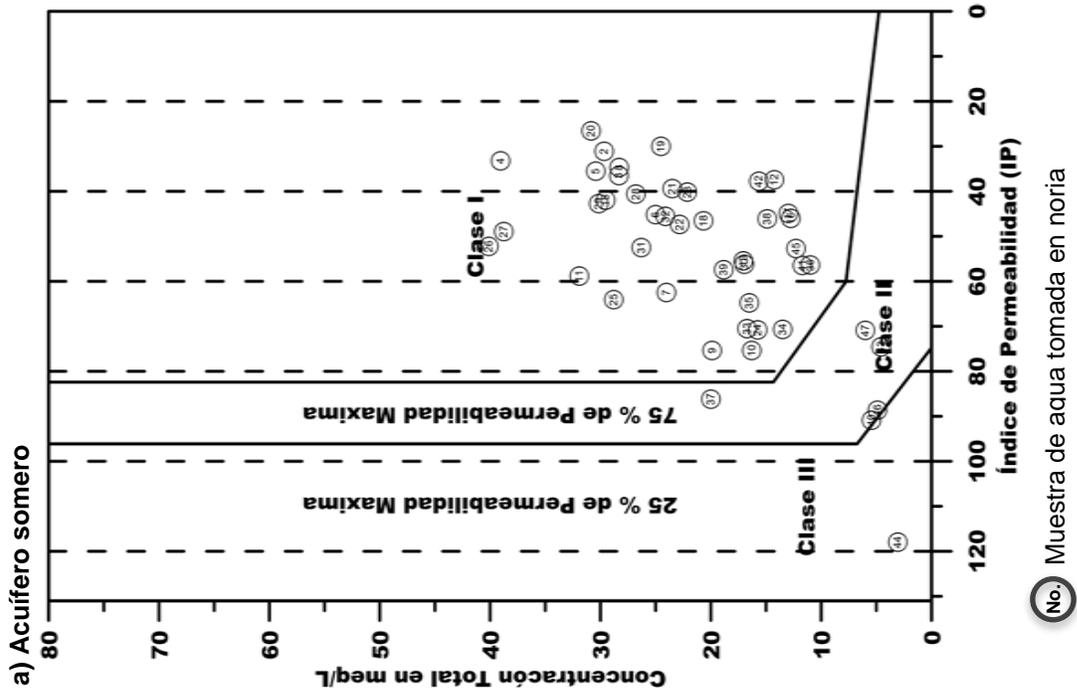
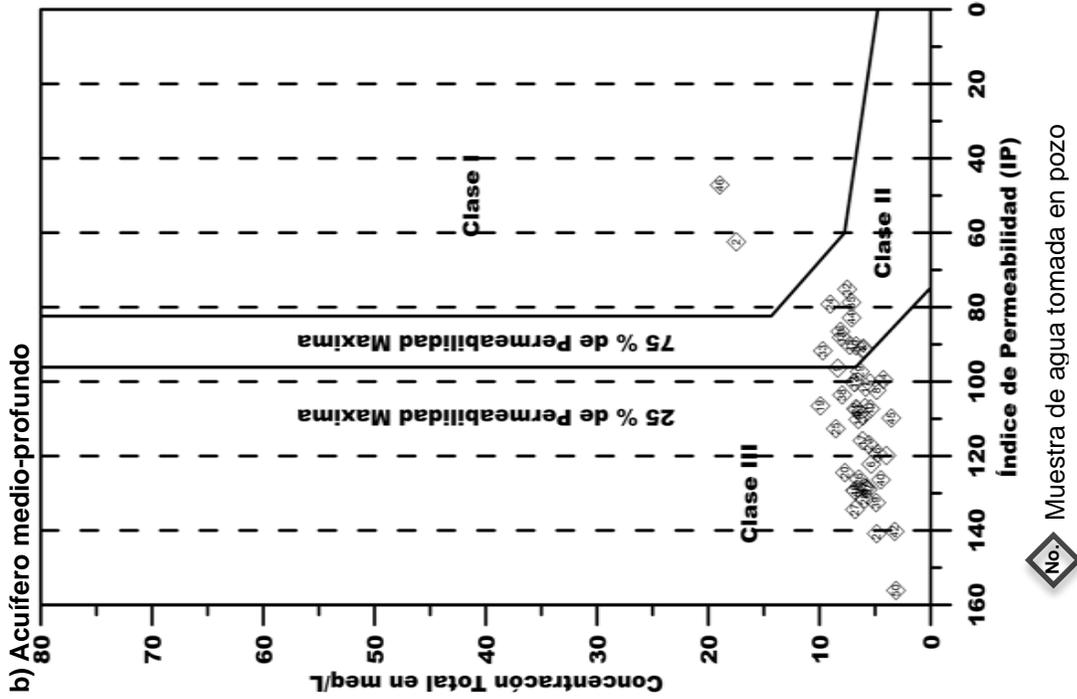


GRÁFICO 4.4.- CLASIFICACIÓN DONEEN DEL AGUA DE RIEGO EN BASE AL ÍNDICE DE PERMEABILIDAD

### 4.3. Evaluación de la calidad del agua para uso industrial

#### 4.3.1. Industria del hierro y acero

Para la Industria del acero, se tiene que el 72.34% de las muestras fueron aceptables para esta actividad en el acuífero somero, teniendo problemas con el pH y sulfatos (**Tabla 3.16**). La distribución espacial de las zonas con calidad aceptable se encuentran en la localidad de Terreros Sur e inmediaciones, rancho el aguaje y una franja central que atraviesa de norte a sur la mancha urbana de San Luis Potosí, hacia el anillo periférico norte y carretera a Matehuala (Figura). En el acuífero medio-profundo, la calidad del agua es aceptable con el 100% de las muestras, teniendo como parámetro que rebaso el límite permisible el pH (**Tabla 3.16 y Figura 4.6**).

#### 4.3.2. Industria de bebida y alimentos

Para la industria de la bebida en el proceso de cocción, demuestra una tendencia de calidad buena en el agua para el acuífero somero, debido a los parámetros de evaluación hierro y manganeso, son aceptables (**Tabla 3.17**), las muestras que presentan menor calidad es por manganeso al sobre pasar los límites permisibles (**Tabla 3.17**), teniendo un 89.36% de las muestras como aceptables. En su representación espacial tiene un comportamiento predominante de calidad buena y las zonas donde el manganeso fue mayor al límite se dan en la muestra tomada en el parque de morales (oeste de la mancha urbana de San Luis Potosí), en la providencia (municipio de Soledad de Graciano Sanchez), cercanías de la localidad de los Gómez, otra en la zona industrial y hacia el sureste del área de estudio (**Figura 4.7**). La clasificación para el acuífero medio-profundo tiene una clasificación excelente en toda sus muestras y extensión del área de estudio (**Tabla 3.17 y Figura 4.7**).

En la Industria de fabricación de cerveza se evaluaron 13 parámetros (**Tabla 3.17**). El 10.64% de las muestras fueron aceptables para el acuífero somero (**Tabla**

**3.17)**, tuvieron problemas con el hierro y las muestras no recomendables presentaron problemas con el pH, sólidos disueltos totales, calcio, hierro, sulfato, cloro y alcalinidad. En la distribución espacial la zona idónea por calidad de agua se encuentra en la cercanías de la zona de recarga de la sierra de San Miguelito en las localidades de Tierra Blanca, el Aguaje y Terrero Sur (**Figura 4.7**). Para el acuífero profundo el 52% de las muestras fueron aceptables, los parámetros que sobre paso los límites fueron pH, Hierro, cloruros, alcalinidad y en algunas flúor, en cuanto a su distribución espacial las zonas de calidad aceptable se situaron a las cercanías de la localidad Gral. Enrique Estrada (municipio de San Luis Potosí) y localidad de la pila (**Figura 4.7**).

El 57.45% de muestras fueron aceptadas en el acuífero somero para la fabricación de bebidas carbonatadas, en cuanto a los parámetros que sobrepasaron el límite permisible fueron la alcalinidad y el flúor en todas las muestras, mientras que en otras muestras fueron sólidos disueltos totales y sulfato. En cuanto a su distribución espacial las zonas con una calidad aceptable para su uso, son en la colonia el Mezquital y San José de Buenavista (al este de la mancha urbana), a las cercanías del vivero municipal (Al sur de la mancha urbana) y en la localidad de Terreros sur (**Figura 4.7**). La producción de bebidas carbonatadas con muestras de agua tomadas del acuífero medio-profundo tienen el 18% clasificadas como aceptable teniendo como principal problema el flúor, la alcalinidad y en menor medida el pH (**Figura 4.7**). Las zonas clasificadas como calidad aceptable se ubican en una franja que va del centro de la mancha urbana de San Luis Potosí al anillo periférico norte y hacia la carretera a Matehuala (**Figura 4.7**).

En la industria de los alimentos, en cuanto a la confitería se evaluaron 5 parámetros (**Tabla 3.17**) de los cuales el problema que estuvo presente en todas las muestras fueron los sólidos disueltos totales, seguidos en menor cantidad el manganeso y el pH, siendo aceptables el 87.23% en el acuífero somero (**Tabla 3.17**). Su distribución espacial en la mayoría la región se muestra aceptable,

teniendo como zonas de menor calidad del agua en el parque de morales (oeste de la mancha urbana de San Luis Potosí), en la providencia (municipio de Soledad de Graciano Sanchez), cercanías de la localidad de los Gómez, rancho el sacrificio, en la zona industrial y hacia el sureste del área de estudio (**Figura 4.7**). El acuífero medio-profundo para la industria de alimentos en confitería es aceptable en un 54%, los parámetros que afectan la calidad del agua son los sólidos disueltos totales y en menor medida el pH. en la distribución espacial la zona con mayor porcentaje de parámetros permisibles fue a inmediaciones de la localidad de milpillas (municipio de San Luis Potosí), una franja que va desde la localidad de Sta. Rita, pasando por la delegación de Villa de Pozos, la zona industrial, parque tangamanga y siguiendo hacia el anillo periférico norte (**Figura 4.7**).

Para la industria en producción de leche, todas las muestras fueron clasificadas como no aptas en el acuífero somero y el acuífero medio-profundo (**Tabla 3.17** y **Figura 4.7**).

En cuanto a la industria de alimento en los proceso de alimentación, enlatado y refrigeración, los parámetros fuera de límites permisibles como pH, sólidos disueltos totales, amonio y alcalinidad se presentaron en la mayoría de las muestras, teniendo como aceptables el 65.96% para el acuífero somero (**Tabla 3.17**). La ubicación de las zonas favorables para el desarrollo de esta actividad se encuentran en la colonia el Mezquital (al este de la mancha urbana), en inmediaciones del rancho Torres Corzo, cercanías del parque Tangamanga II, anillo periférico norte, en la colonia la lomita (municipio de Soledad de Graciano Sánchez), zona industrial y en la localidad de Terreros sur (**Figura 4.7**). Los procesos de alimentación, enlatado y refrigeración, en el acuífero medio-profundo el 98% de las muestras tienen una calidad aceptable. Siendo la única zona no recomendable sobre la carretera a matehuala a la altura del aeropuerto de San Luis Potosí.

El proceso de alimento en el acuífero somero se ve afectado en la mayoría de las muestras por los parámetros de sólidos disueltos totales, nitratos y alcalinidad, teniendo un 68.09% de muestras clasificadas como aceptables para su uso en el acuífero somero (**Tabla 3.17**). Las zonas con clasificaciones aceptables se encuentran en la zona de recarga de la sierra de San Miguelito, las colonias de Sta. Rosa y el mezquital (municipio de San Luis Potosí) y las localidades de San José de Buenavista y Capulines (municipio de San Luis Potosí) y en cercanías del rancho el Diamante (**Figura 4.7**). En el acuífero medio-profundo el 70% de las muestras son de calidad aceptable, estando presente problemas de flúor y alcalinidad, en cuanto a la distribución espacial en la región noroeste del área de estudio (**Figura 4.7**).

La industria en producción de azúcar, predomina la calidad del agua no aceptable, teniendo como principales parámetros que exceden los límites permisibles el calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato y cloro, teniendo el 8.51% de muestras como aceptables en el acuífero somero. Las ubicaciones donde las muestras tienen una clasificación aceptable son en la colonia de Tierra Blanca, la localidad de Terreros Sur y al sur del área de estudio (**Figura 4.7**). El acuífero medio-profundo tiene un 72% de muestras de agua con calidad aceptable, presenta problemas para este proceso con el calcio y bicarbonatos (**Tabla 3.17**). Las zonas con una clasificación aceptable se encuentran en el sur del área de estudio hacia el este de la mancha urbana (**Figura 4.7**).

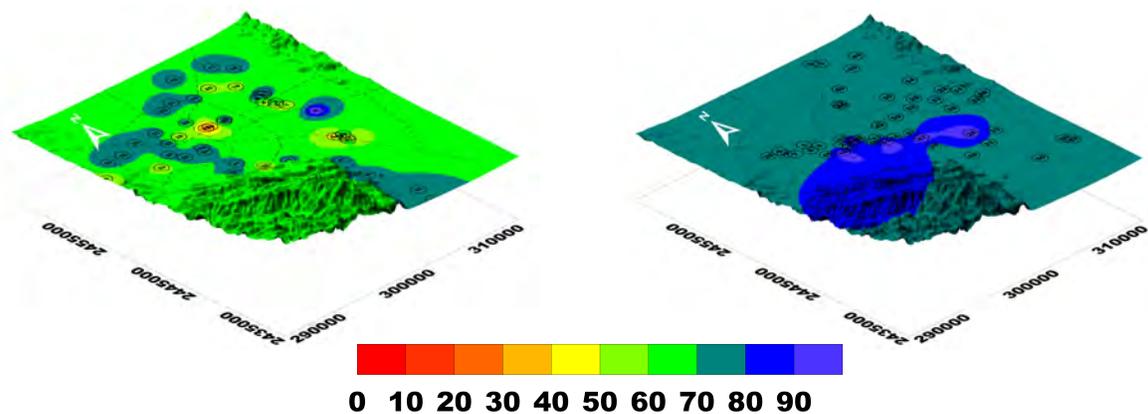
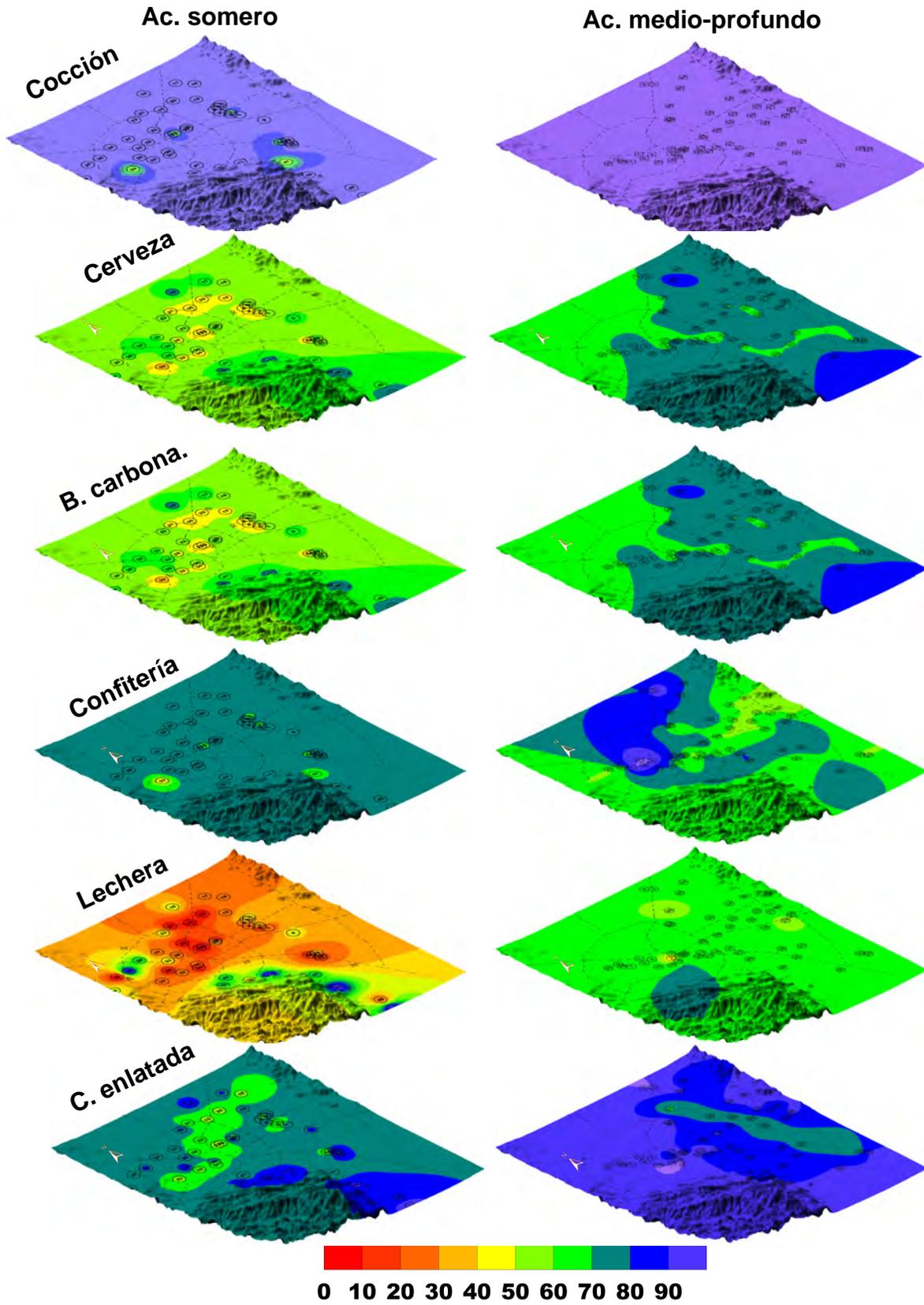


FIGURA 4.6.- MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA LA INDUSTRIA DE HIERRO Y ACERO.



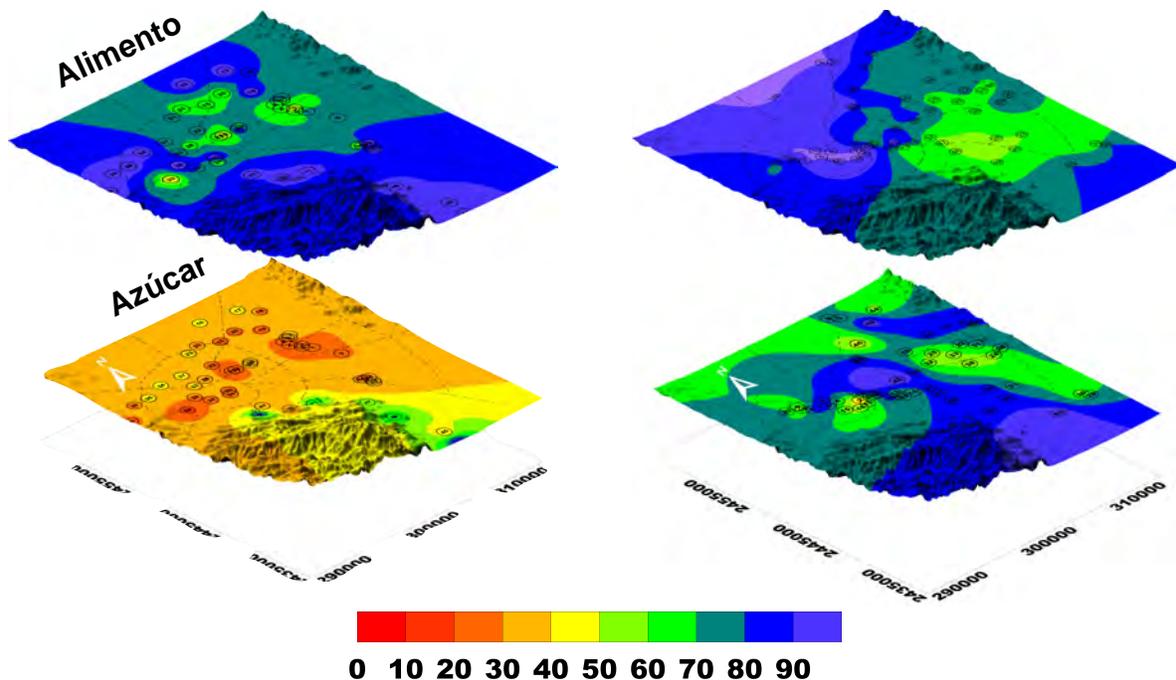


FIGURA 4.7.- MAPA DE DISTRIBUCIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA LA INDUSTRIA DE LA BEBIDA Y ALIMENTOS.

#### 4.4. Vulnerabilidad acuífera

Los resultados que se obtuvieron para los parámetros empleados en la metodología para la obtención de la vulnerabilidad acuífera DRASTIC, se obtuvieron para el sistema hidrogeológico del VSLP.

##### 4.4.1. Profundidad del nivel estático (D<sub>r</sub>)

En el parámetro de profundidad del nivel estático se aplicó una modificación a la escala original, con el fin de evaluar integralmente (Ramos Leal, 2002), se empleó información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2014bb) correspondiente a N.E. de norias y pozos, con la cual se realizó un mapa de distribución espacial con el software Surfer, obteniendo el parámetro para el acuífero somero y el medio-profundo.

El comportamiento en el acuífero somero denota N.E. que van de 0 a 36 mts. Su distribución espacial es Suroeste (menor profundidad de N.E.) a Noreste (mayor

profundidad del N.E.) del área de estudio (**Figura 4.8**).

#### 4.4.2. Recarga neta ( $R_r$ )

Se tomará este mismo parámetro para el análisis de los dos acuíferos, para la obtención de este parámetro se utilizó la información de estaciones climatológicas (CONAGUA, 2015), generando estadística para precipitación mediante polígonos de Thiessen y evapotranspiración potencial por el método de Turc (Turc, 1953)

**Tabla 4.5.**

**TABLA 4.5.- ESTADÍSTICA DE LA OBTENCIÓN DE LA RECARGA NATURAL**

ID	Precipitación mm/año	Evapotranspiración mm/año	Recarga Natural
24100	341.90	324.63	17.27
24078	358.20	333.66	24.54
24163	334.3	314.71	19.59
24101	213.2	216.43	-3.23 = 0
24046	353.4	336.33	17.07
24034	531.1	443.36	87.74
24177	496.2	448.84	47.36
24106	316.6	305.09	11.51
24071	589.8	488.01	101.79
24004	566	473.19	92.81
24103	575.9	486.18	89.72
24008	637.7	519.16	118.54
24032	619.3	493.95	125.35
24102	302.1	295.37	6.73
24098	328.4	316.02	12.38
24021	419	373.05	45.95
24038	367.60	348.38	19.22
24061	306.3	296.73	9.57
24042	387.1	358.44	28.66
32127	346.9	324.84	22.06

ID	Precipitación mm/año	Evapotranspiración mm/año	Recarga Natural
24024	388.1	357.66	30.44
24069	366.2	343.49	22.71
24070	526.1	469.11	56.99
24081	311.2	301.23	9.97
24153	337.5	322.87	14.63
24179	361.3	333.00	28.30
24197	283.9	279.50	4.40

Empleando el Sistema de Información Geográfica GRASS GIS, en el proceso de delimitación de cuenca, polígonos de Thiessen e interpolación inversa ponderada para la evapotranspiración potencial. Además se consideraron los factores de recarga inducida: retorno de riego (10.5 Mm<sup>3</sup>/año) e infiltración por fugas en el sistema de agua potable (23.8 Mm<sup>3</sup>/año) (CONAGUA, 2009), las cuales se situaron espacialmente, con percepción remota ubicando las áreas agrícolas o de mayor densidad de vegetación para el retorno de riego y áreas urbanas para considerar la infiltración por fugas en el sistema de agua potable. Una vez obtenido los parámetros se utilizó la siguiente ecuación:

$$RN = Pr - EVP + R_{\text{riego}} + I_{\text{fugas}}$$

Donde:

Rn: Recarga neta en mm/año

Pr: Precipitación en mm/año

EVP: Evapotranspiración en mm/año

R<sub>riego</sub>: Retorno por riego en mm/año

I<sub>fugas</sub>: Infiltración por fugas en mm/año

Resultando de esta ecuación el mapa de recarga neta el cual al este y oeste del área de estudio se encuentra con ponderación de 3 correspondiente a una infiltración entre 50 a 100 mm, mientras que en la franja central de norte a sur presenta ponderación de 1 siendo infiltraciones menores a 50 mm y contrastando

con las recargas inducidas por el retorno de riego y de fugas del sistema de agua potable con infiltraciones mayores a 254 mm (**Figura 4.8**).

#### 4.4.3. Medio acuífero ( $A_r$ )

En este parámetro se correlaciono con los niveles estáticos y la litología de los pozos para obtener una distribución espacial, en base a esto clasificar.

La distribución del medio acuífero del somero se ve relacionado con su geología (G. G. Labarthe-Hernández y Jiménez-López, 1992), en el cual en la Sierra de San Miguelito y Sierra de Álvarez sus ponderaciones son bajas de 2 a 3 siendo del terciario volcánico, en la parte baja de ellas los valores aumentan a 4 y 5 en formaciones de conglomerado del terciario, en material del cuaternario volcánico situado en la planicie compuesto por limos, arcillas y arenas tiene una ponderación de 7 y conglomerado de depósitos aluviales tiene un valor 9 y 10 (**Figura 4.8**).

Mientras que para el acuífero medio-profundo hacia la parte de la Sierra de San Miguelito y Sierra de Álvarez tiene valores bajos de 3 y 4, hacia el centro se empieza a presentar el acuífero fracturado con ponderaciones de 5 y hacia el acuífero granular valores de 6 y 7 (**Figura 4.8**).

#### 4.4.4. Tipo de Suelo ( $S_r$ )

Se consideró el parámetro obtenido para los dos acuíferos, el cual se definió de acuerdo a las características de suelo se tomó en la parte de la Sierra de San Miguelito como en la Sierra de Álvarez como suelo de fino o ausente con ponderaciones de 10 a 8 y hacia las partes bajas de la sierra agregado arcilloso y gravas con valores de 7 y 6, en el centro del valle con tendencias de arena, grava y limo con ponderaciones de 4 a 6 (**Figura 4.8**).

#### 4.4.5. Gradiente Topográfico ( $T_r$ )

De igual manera este parámetro obtenido se empleara en los dos acuíferos donde su distribución está marcada claramente en la parte central del valle donde la pendiente es menor al 2%, con un valor de peso 10 y en la Sierras de San

Miguelito y de Álvarez cuentan con pendientes que son mayores al 12% con una ponderación que va de 1 a 4 (**Figura 4.8**).

#### 4.4.6. Impacto a la zona vadosa ( $I_r$ )

Para el impacto de la zona vadosa en el acuífero somero se tienen valores de bajo impacto en las zonas de las Sierra de San Miguelito y Sierra de Álvarez con pesos de 1 y 2, en el centro del valle van de 5 a 7 siendo para litología de arenas, gravas, con limos y arcillas, a la región del centro del valle se considero el impacto que tiene las fugas de agua del sistema de distribución de agua potable debido a que esto se propicia en por lo menos 50 cm. por debajo del nivel de terreno natural lo que ocasionaría en algunas zonas un impacto directo al acuífero, por lo tanto se le daría ponderaciones de 8 a 10 (**Figura 4.8**).

En el acuífero medio-profundo hacia las Sierras de San Miguelito y Álvarez, presenta valores de 5 y alcanza valores altos en una zona de la Sierra de Álvarez debido a la profundidad de este, se encuentra por encima de los demás y en la zona de la mancha urbana tiene valores 6 a 7 (**Figura 4.8**).

#### 4.4.7. Conductividad hidráulica ( $C_r$ )

La conductividad hidráulica en el acuífero somero presenta valores de 2 y 4 en las zonas de la Sierra de San Miguelito y de Álvarez, ellos pueden ser considerados bajos. Aumenta, de 5 a 8, en el centro del área de estudio. La zona con mayor conductividad se encuentra en las fallas localizadas en la mancha urbana de San Luis Potosí (**Figura 4.8**).

El acuífero medio-profundo presenta un comportamiento similar, la conductividad hidráulica es baja en las formaciones subyacentes a las sierras de San Miguelito y de Álvarez, en el centro presenta valores de 4 a 6 y alcanza valores de 10 en la zona de fallas (**Figura 4.8**).

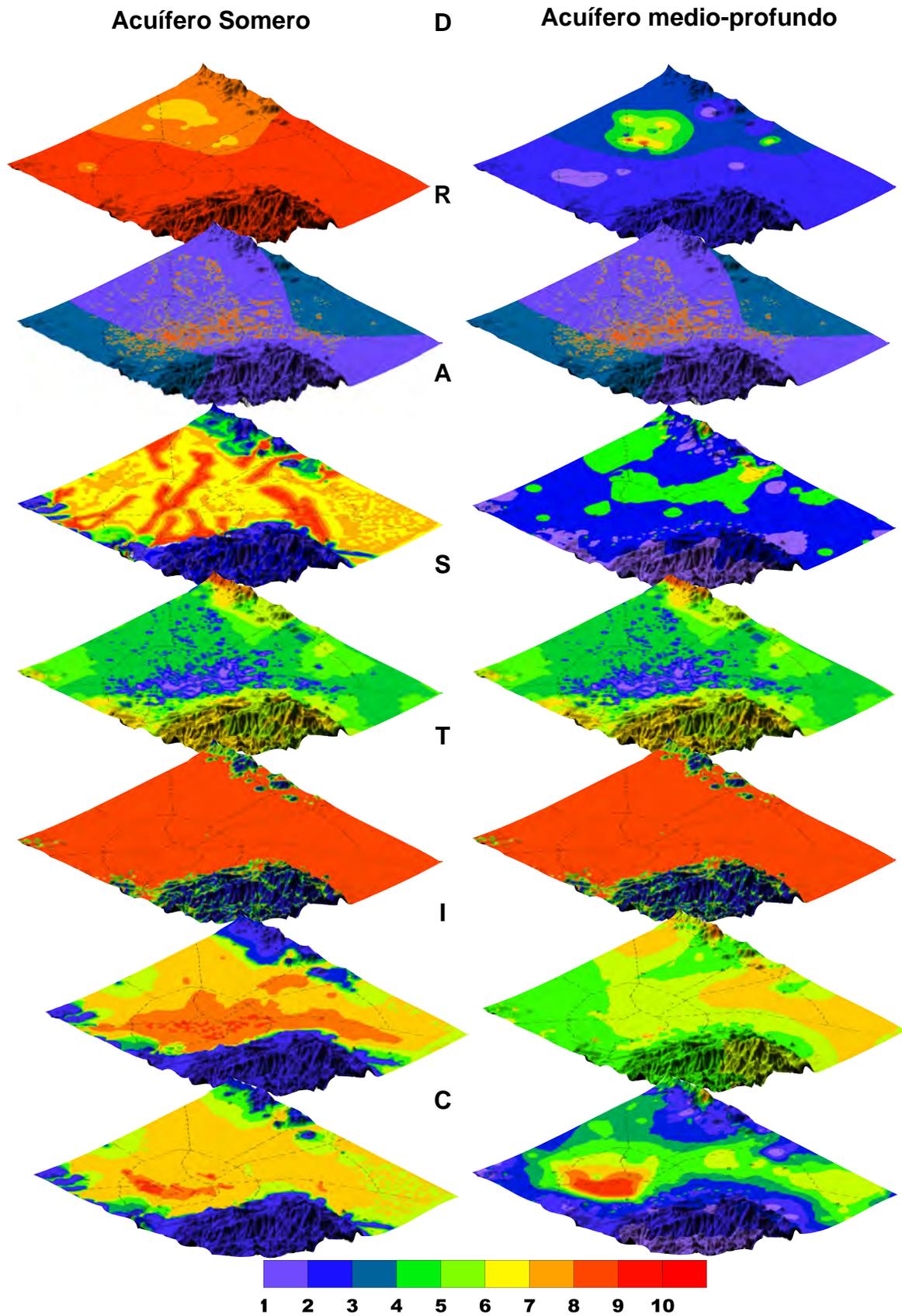
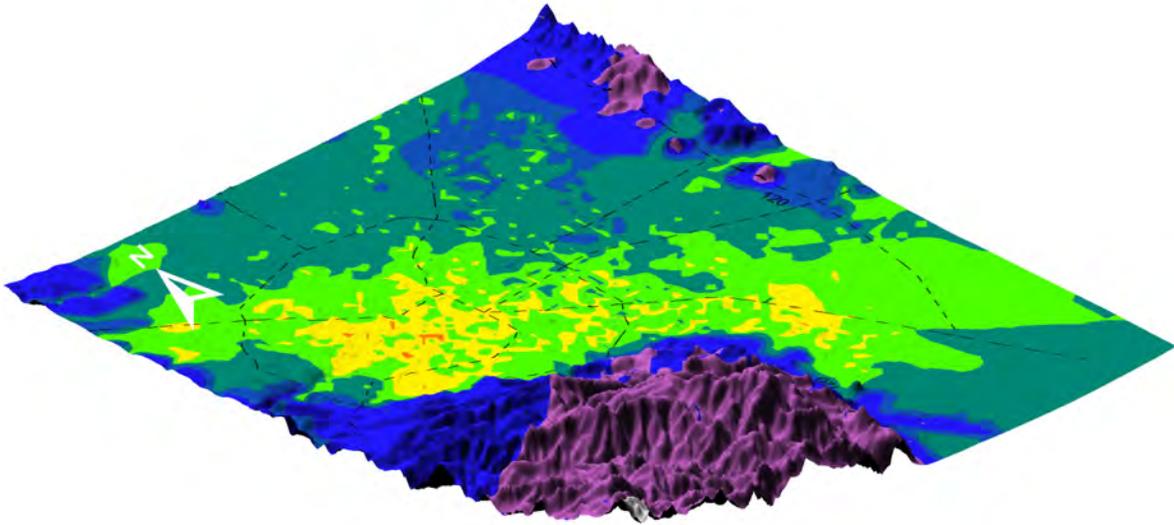
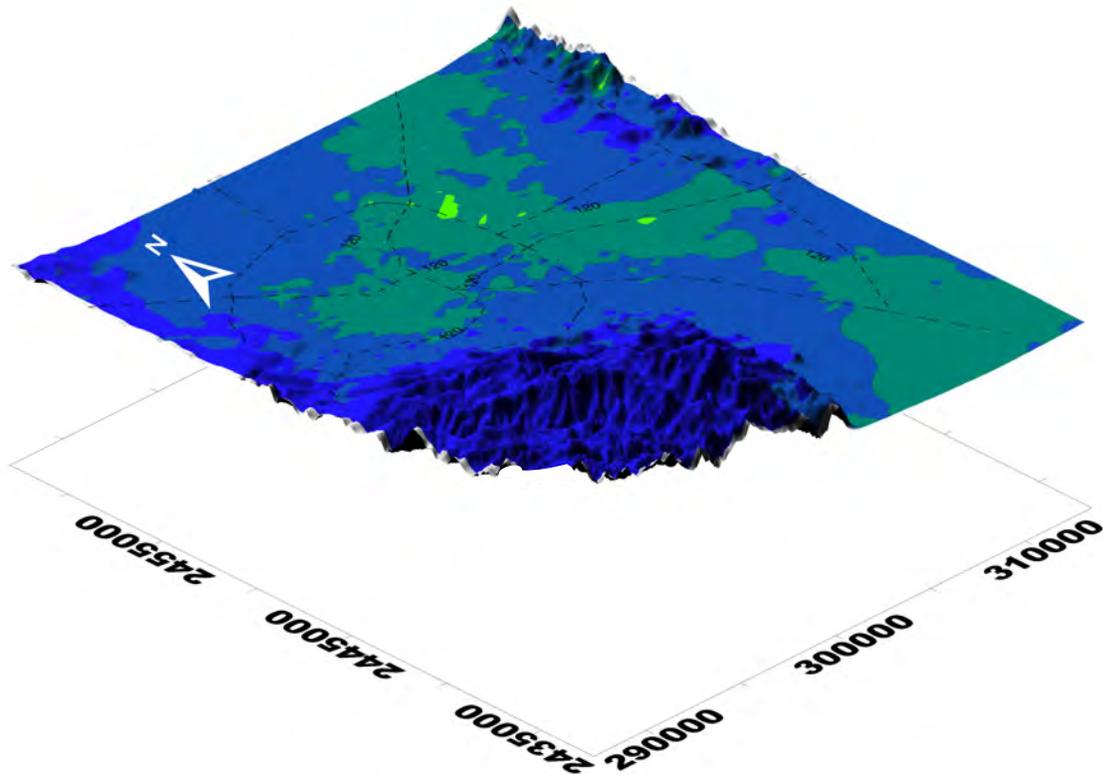


FIGURA 4.8.- MAPAS DE DISTRIBUCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL ÍNDICE DRASTIC

**Acuífero somero**



**Acuífero medio-profundo**



**FIGURA 4.9.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD ACUÍFERA**

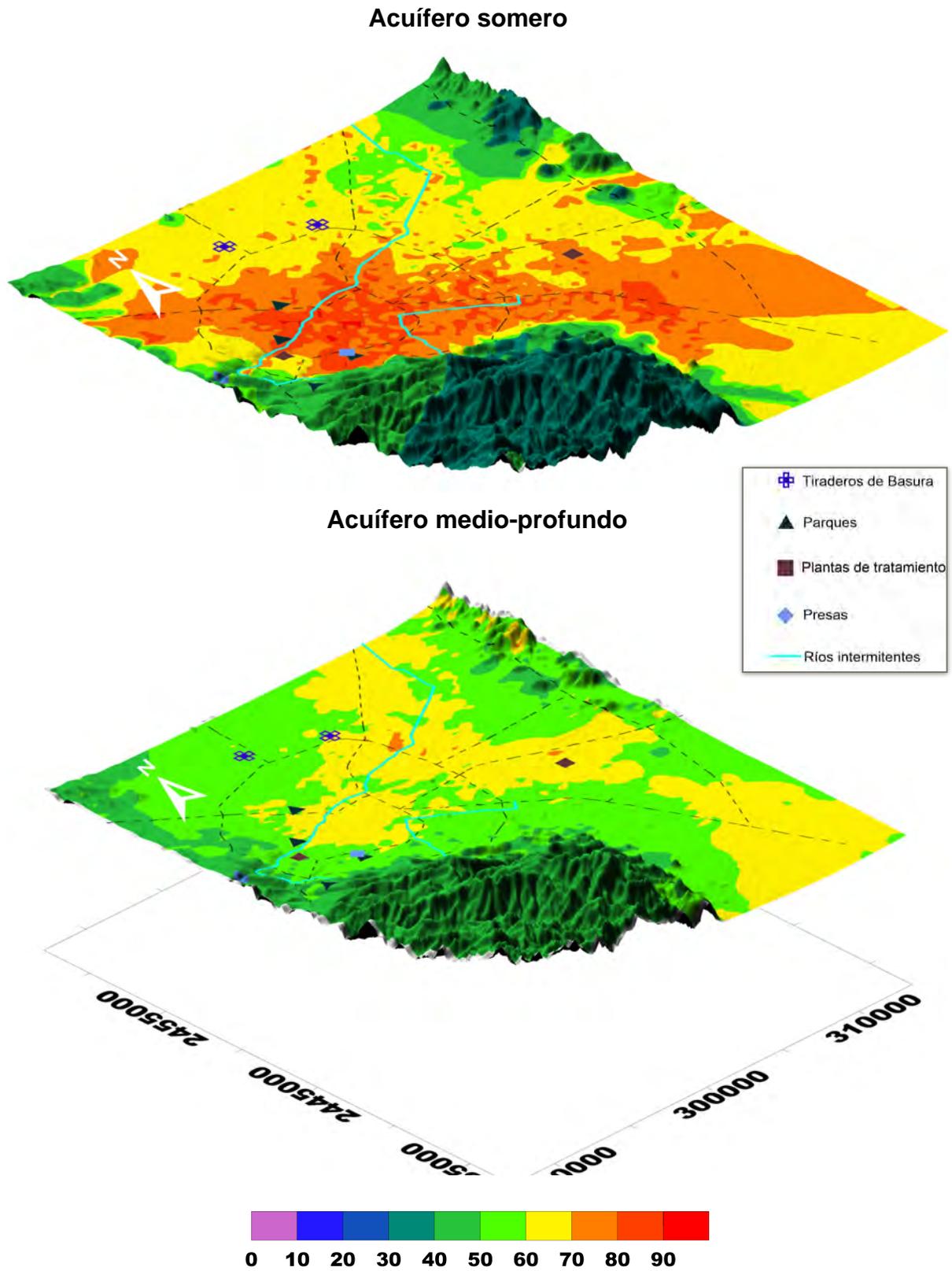


FIGURA 4.10.- DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD ACUÍFERA DRASTIC NORMALIZADO.

#### 4.4.8. Evaluación de la vulnerabilidad acuífera DRASTIC

Para una mejor interpretación del mapa de vulnerabilidad acuífera se utilizó un mapa de vulnerabilidad normalizado (Ramos Leal, 2002). En donde la vulnerabilidad acuífera para el acuífero somero, guarda una correlación directa con los parámetros del DRASTIC se muestra en la Sierra de San Miguelito y Sierra de Álvarez una baja vulnerabilidad (**Figura 4.10**), mientras en la mancha urbana se muestra una vulnerabilidad alta debido a factores de peso como la profundidad del nivel estático, la recarga neta y el impacto de la zona vadosa (**Figura 4.8**).

En el acuífero medio-profundo muestra una vulnerabilidad que va de media a baja, teniendo los valores bajos en sectores de las Sierra de San Miguelito y Sierra de Álvarez y valores de peso medio en la planicie del valle, presentando zonas puntuales en términos de vulnerabilidad media (**Figura 4.8**).

## 5. Conclusiones

La calidad del agua para consumo humano en el acuífero colgado considerando la NOM-127-SSA1-1994; se obtuvieron características fuera de los límites permisibles como lo son microorganismos coliformes totales y fecales, Mn, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, pH, Na, SDT, SO<sub>4</sub> y SAAM. Mientras que para el acuífero profundo el flúor y el pH rebasa los límites permisibles para esta norma.

El ICA para el acuífero colgado, muestra una deficiente calidad de agua. Los indicadores obtenidos refieren a una calidad que en su mayoría va de contaminada y excesivamente contaminada. En tanto que, en el acuífero medio-profundo para este uso es de buena calidad.

En el ICON para el acuífero colgado alcanza valores positivos que indican contaminación; en tanto que para el acuífero medio-profundo los índices son principalmente negativos que indican una baja o nula contaminación.

Para la calidad del agua para uso agrícola se consideraron los índices de RAS, CE, %Na, SE y SP. En el caso del acuífero colgado, para el diagrama de Wilcox (RAS vs CE) presenta una sodicidad baja y una salinidad que va de baja a alta, predominando la clasificación de alta salinidad.

El acuífero medio-profundo, en el diagrama de Wilcox (RAS vs CE) presenta una sodicidad baja y una salinidad de baja a media, teniendo su mayor presencia en salinidad media.

En cuanto al %Na en el acuífero colgado su clasificación va de buena a dudosa, teniendo su mayor densidad de muestras clasificadas como buena a permisible y el acuífero medio-profundo tiene predominantemente una clasificación de buena a excelente.

Para la SE en el acuífero colgado su clasificación va de buena a condicionada,

siendo la condicionada con mayor presencia de muestras y el acuífero medio-profundo sus muestras se clasifican de buena a excelente, clasificándose la mayoría como buena.

En la SP en el acuífero colgado su clasificación va de buena a condicionada y para el acuífero medio-profundo es predominantemente buena.

La calidad del agua para uso industrial en todos los procesos denota el acuífero medio-profundo, mejor calidad del agua, sin embargo se denota en algunos procesos la presencia de flúor como parámetro coincidente en cuanto a los resultados obtenidos en la evaluación de calidad del agua para consumo humano como agrícola.

La vulnerabilidad acuífera en el acuífero somero denota una gran incidencia de las actividades antropogénicas, debido tanto al nivel estático somero y a las recargas inducidas ocasionando una vulnerabilidad alta en la zona de la mancha urbana, en cuanto a la vulnerabilidad acuífera en el acuífero medio profundo se clasifica de baja a media, a lo cual es congruente en comparación a las condiciones del acuífero somero. Los resultados obtenidos se confirman con la tendencia en la calidad del agua para consumo humano, uso agrícola, uso industrial. El acuífero colgado con respecto al acuífero medio profundo son muy diferentes y contrastantes.

## Bibliografía

- Aguillón-Robles, A., Aranda-Gómez, J. J., y Solorio-Munguía, J. G. (1994). Geología y tectónica de un conjunto de domos riolíticos del Oligoceno medio en el sur del Estado de San Luis Potosí, México. *Rev. Mex. Cienc. Geol*, 11(1), 29-42.
- Aller, L., Lehr, J. H., Petty, R., y Bennett, T. (1987). Drastic: A standardized system to evaluate ground water pollution potential using hydrogeologic settings.
- Authority, E. P. (1993). Draft Western Australian Water Quality Guidelines for Fresh and Marine Waters. *Environmental Protection Authority Bulletin*, 711.
- Backman, B., Bodiš, D., Lahermo, P., Rapant, S., y Tarvainen, T. (1998). Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia. *Environmental Geology*, 36(1-2), 55-64.
- Barrios, I. (2014). Calidad de aguas naturales y residuales en el sistema hidrográfico Valle del Mezquital, Hidalgo México.
- Brown, R., McClelland, N., Deininger, R., y Tozer, R. (1970). "A water Quality index-do we dare?" *Water and Sewage Works*.
- Castillo-Cruz, A. (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 de Licenciatura, Ingeniero Geólogo, Facultad de Ingeniería UASLP.
- Civita, M. (1990). Assessment of aquifer vulnerability to contamination, "Protezione e Gestione delle acque Sotteranee Metodologie, Technologie r Obbietivi", *Marano sul Panaro*, 3, 39-86.
- CONAGUA. (1996). Actualización Geohidrológica del Valle de San Luis Potosí, México.
- CONAGUA. (2007). Muestreo de pozos en el Valle de San Luis Potosí.
- CONAGUA. (2009). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea en el acuífero de San Luis Potosí. *Diario Oficial de la Federación*.
- CONAGUA. (2013). Estadísticas del agua en México. Retrieved from <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGP-2-14Web.pdf>.
- CONAGUA. (2014a). Atlas del agua en México 2014.
- CONAGUA. (2014b). Base de datos de pozos y norias del valle de San Luis

Potosí.

- CONAGUA. (2014c). Censo de aprovechamientos del valle de San Luis Potosí.
- CONAGUA. (2014d). PROGRAMA NACIONAL HÍDRICO 2014-2018.
- CONAGUA (Cartographer). (2015). Estaciones Climatologicas. Retrieved from [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=42&Itemid=75](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75)
- Couillard, D., y Lefebvre, Y. (1985). Analysis of water-quality indices. *J. Environ. Manage.;*(United States), 21(2).
- Doneen, L. D. (1964). Notes on water quality in agriculture. *Water science and engineering paper 4001.*
- EPA. (2014). Water Quality Standards for Surface Waters. Retrieved from <http://water.epa.gov/scitech/swguidance/standards/>
- Fernández-Vítora, V. C. (2009). Guía metodológica para la evaluación del impacto ambiental: Mundi-Prensa Libros.
- Foster, S., y Hirata, R. (1988). Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas: una metodología basada en datos existentes. *Determinacion del riesgo de contaminacion de aguas subterranas: una metodologia basada en datos existentes: OPS.*
- INEGI. (2009). Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos San Luis Potosí, Soledad de Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona y Cerro de San Pedro en el estado de San Luis Potosí.
- IPICYT. (2006). Estudio geológico, geofísico y geohidrológico del predio Ciudad Satélite ubicado entre el Libramiento Oriente y la carretera a Río Verde: San Luis Potosí. Retrieved from
- IPICYT. (2007a). Calidad del agua del acuífero colgado en el Valle de San Luis Potosí.
- IPICYT. (2007b). Estudio Hidrogeológico de la porción oriental del Valle de San Luis Potosí.
- Jairo, R. (2009). Calidad del agua. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Tercera edición. Bogotá.
- Labarthe-Hernández, G., y Jiménez-López, L. S. (1992). Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la Sierra de San Miguelito. SLP: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología,

- Folleto Técnico, 114, 1-34.
- Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., y Aranda-Gómez, J. J. (1982). Revisión estratigráfica del Cenozoico de la parte central del estado de San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Geología y Metalurgia, Folleto Técnico, 85(208), 1.
- López-Álvarez, B., Ramos-Leal, J. A., Carbajal, N., Hernandez-García, G., Moran-Ramírez, J., y Santacruz-DeLeón, G. (2014). Modeling of Groundwater Flow and Water Use for San Luis Potosí Valley Aquifer System. *Journal of Geography and Geology*, 6(3), p147.
- López-Álvarez, B., Ramos-Leal, J. A., Moran-Ramírez, J., Cardona Benavides, A., y Hernández Garcia, G. (2013). 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. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 9-26.
- Mancilla, O. (2012). Indices de salinidad y calidad de las aguas superficiales de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.
- Margat, J. (1968). *Vulnérabilité des nappes d'eau souterraine à la pollution*. BRGM Publication, 68.
- Martínez de Bascaran, G. (1979). Establecimiento de una metodología para conocer la calidad del agua. *Boletín Informativo del Medio Ambiente*.
- Morán Ramírez, J. (2009). Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí. Universidad del Noreste Escuela de Químico-Biológicas, colaboración IPICYT.
- Nieto-Samaniego, A. F., Macías-Romo, C., y Alaniz-Alvarez, S. A. (1996). Nuevas edades isotópicas de la cubierta volcánica cenozoica de la parte meridional de la Mesa Central. *México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 13(1), 117-122.
- NOM-127, N. O. M. (2000). NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental.
- Palacios, V. O. (1970). Instructivo para el muestreo registro de datos e interpretación de la calidad del agua para riego agrícola: Escuela Nacional de Agricultura.
- Porta, J., y López-Acevedo, M. (2010). *Introducción a la edafología: uso y protección del suelo* (2da. ed.).
- Ramos Leal, J. A. (2002). Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e Impacto Ambiental, Caso Río Turbio, Guanajuato. Tesis de Doctorado. Instituto de Geofísica, UNAM.

- Ramos-Leal, J. A., Martínez-Ruiz, V. J., Rangel-Mendez, J. R., y de la Torre, M. C. A. (2007). Hydrogeological and mixing process of waters in aquifers in arid regions: a case study in San Luis Potosi Valley, Mexico. *Environmental Geology*, 53(2), 325-337.
- Richards, L. A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington: United States Salinity Laboratory, 1954. 160p. USDA. *Agriculture Handbook*, 60.
- Rodríguez, M., D'Urso, C., Rodríguez, G., y Sales, A. (2008). Evaluación de la Calidad de Aguas para Riego de la Cuenca del Río Calera, Tucumán, Argentina.
- Scofield. (1936). The salinity of irrigation water. *Smithson. Rep. No. 1935*, 275-287.
- Tristán-González, M. (1986). Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico, 107, 91.
- Turc, L. (1953). *Le bilan d'eau des sols: relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*: Institute National de la Recherche Agronomique.
- UNESCO/WHO/UNEP. (1996). *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring* (D. Chapman Ed. 2 ed.): E&FN Spon, an imprint of Chapman & Hall.
- UNESCO/WWDR. (2003) *Agua para Todos, Agua para la Vida*. World Water, Assessment Programme, Ediciones UNESCO.
- UNESCO/WWDR. (2014) *Informe de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2014*. UN WATER.
- Wilcox, L. (1955). *Classification and use of irrigation waters*.
- Wilcox, L. V. (1948). The quality of water for irrigation use. *Technical Bulletin No. 962*, 40.
- Wilcox, L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters*.
- Zaporozec, A. (2004). *Groundwater contamination inventory: a methodological guide with a model legend for groundwater contamination inventory and risk maps*. IHP-VI, series on groundwater, 2: UNESCO, Paris.