



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA  
SUBTERRÁNEA

EVALUACIÓN DE LIXIVIADOS DE COLUMNAS DE SUELO DEL ACUÍFERO  
TABALAOPA-ALDAMA PARA INFILTRACIÓN DE AGUA DE CALIDAD  
EN BASE A LA NOM-127-SSA1-1994

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

ING. JUAN PABLO CORRAL SÍAS

CHIHUAHUA, CHIH.

DICIEMBRE, 2016



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y  
POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN HIDROLOGÍA  
SUBTERRÁNEA

EVALUACIÓN DE LIXIVIADOS DE COLUMNAS DE SUELO DEL  
ACUÍFERO TABALAOPA-ALDAMA PARA INFILTRACIÓN DE AGUA  
DE CALIDAD  
EN BASE A LA NOM-127-SSA1-1994

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO EN MAESTRO DE INGENIERÍA

APROBADO:

Dr. Alejandro Villalobos Aragón, director

Dr. Adán Pinales Munguía, sinodal

Dra. María Socorro Espino Valdés, sinodal

DICIEMBRE, 2016  
CHIHUAHUA, CHIH

Derechos reservados  
© Juan Pablo Corral Sias  
Circuito Número I s/n, Nuevo Campus Universitario II, 31100  
2016

**Tesis desarrollada con apoyo de:**

**Universidad Autónoma de Chihuahua**

**Facultad de Ingeniería**



**World Wildlife Fundation, Inc., (WWF)-  
Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA)**

Con el apoyo de la Alianza



F U N D A C I O N  
G O N Z A L O R Í O A R R O N T E , I . A . P .

Dentro del Acuerdo No. OY49, proyecto “**Estudio del almacenamiento, inducción y recarga de agua de lluvia en acuíferos de Chihuahua, Etapa II**”.

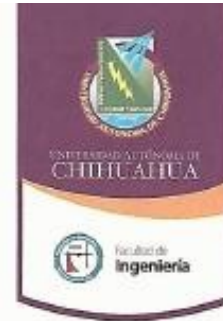
Copyright ©

Por

JUAN PABLO CORRAL SIAS

2016

24 de noviembre de 2016



**ING. JUAN PABLO CORRAL SIAS**

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **Dr. Alejandro Villalobos Aragón** para que lo desarrolle como tesis, con el título: **“EVALUACIÓN DE LIXIVIADOS DE COLUMNAS DE SUELO DEL ACUÍFERO TABALAOPA-ALDAMA PARA INFILTRACIÓN DE AGUA DE CALIDAD EN BASE A LA NOM-127-SSA1-1994”**.

## **ÍNDICE**

**Dedicatoria**

**Agradecimientos**

**Índice de Contenido**

**Índice de Tablas**

**Índice de Figuras**

### **1. Generalidades**

- 1.1 Introducción
- 1.2 Justificación
- 1.3 Trabajos previos
- 1.4 Objetivo general
- 1.5 Objetivos específicos

### **2. Marco teórico conceptual**

- 2.1 Recarga natural
- 2.2 Recarga artificial
- 2.3 Monitoreo de la calidad del agua subterránea
- 2.4 Zona no saturada o zona vadosa

### **3. Medio Físico**

- 3.1 Zona de estudio

### **4. Metodología**

- 4.1 Caracterización de suelo
- 4.2 Columnas de suelo
- 4.3 Análisis químicos del lixiviado
- 4.4 Otros análisis

Facultad de Ingeniería  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00    www.fing.uach.mx





## 5. Discusión de resultados

- 5.1 Caracterización de material
- 5.2 Fluorescencia de rayos X (XRF)
- 5.3 Cloro en suelo
- 5.4 Difracción de rayos X (XRD)
- 5.5 Hidrogeoquímica
- 5.6 Balance iónico
- 5.7 Diagrama de Piper
- 5.8 Diagrama de Stiff
- 5.9 Seguimiento del experimento de columnas de suelo

## 6. Conclusiones y Recomendaciones

## 7. Referencias

## 8. Anexos

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

**ATENTAMENTE**  
"naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ



EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN  
Y POSGRADO

DR. FERNANDO RAFAEL ASTORGA  
BUSTILLOS

Facultad de Ingeniería  
Circuito No.1, Campus Universitario 2  
Chihuahua, Chih. C.P. 31125  
Tel. (614) 442-95-00 [www.fing.uach.mx](http://www.fing.uach.mx)



## **Dedicatoria**

*A mi familia, a mis padres, Jesús Antonio Corral Lozoya y Beatriz Elena Sias Enríquez, a mis hermanos Luis Guillermo y Jesús David.*

## **Agradecimientos**

A Dios por inspirarme a realizar esta etapa de mi vida, por siempre guiarme y ser fuente de fortaleza, entendimiento y sabiduría.

A mi familia que siempre me apoya.

A mi madre Beatriz Elena que siempre es una fuente de consejo.

A mis tíos, tías, primos y primas que siempre están ahí cuando los necesito.

A mis compañeros por su gran amistad y apoyo.

A mis maestros el Dr. Alejandro Villalobos, Dr. Adán Pinales, Dra. María Espino, M.I. Rodrigo De la Garza, M.I. Javier Tonche, M.I. Guadalupe Estrada, Dra. Carmen Julia, Dr. Humberto Silva, M.I. Blas Magallanes, M.I. Nicolás Holguín, y la Dra. Lourdes Villalba por ser un ejemplo de dedicación y vocación, por su disponibilidad, su apoyo, sus enseñanzas y desarrollarme como profesional.

A todo el equipo del proyecto de recarga, Juan Cervantes, Gustavo Domínguez, Miguel Mezquitic, Leonardo Sias, Gaby, Rodrigo de la Garza, Aldo, Rebeca, Heber Chávez, Heber Martínez y especialmente a Ana Armendáriz, por su dedicación e investigación que hizo posible mi proyecto.

A los encargados de los laboratorios y laboratoristas del Lab. de Sanitaria, Irma Peralta, Manuel Contreras, Jacobo Chávez y Pedro Villa, al Lab. de Metalurgia, María Teresa Delgado, al Lab. de Materiales, Mecánica de Suelos y Asfaltos, Raymundo Caballero, al Lab. de Máquinas y Herramientas, Luis Durstewitz y Luis Gonzales de la UACH de la Facultad de Ingeniería y al Lab. de Rayos X, Armando Reyes Rojas y Ernesto Guerrero, de CIMAV, Chihuahua, a Lourdes Flores y Sandra Martínez a todos por su disponibilidad, sus consejos y aportaciones para la realización de esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua, a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de aprender, al Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), la Fundación Gonzalo Rio Arronte por hacer posible y permitirme desarrollar mi investigación en el proyecto de recarga.

¡Muchas Gracias!!...





## Índice de Contenido

|  |      |
|--|------|
| Dedicatoria.....   | xii  |
| Agradecimientos .....                                    | xiii |
| Índice de Contenido.....                                 | xiii |
| Índice de Tablas.....                                    | xv   |
| Índice de Figuras.....                                   | xvii |
| 1. Generalidades .....                                   | 1    |
| 1.1 Introducción.....                                    | 1    |
| 1.2 Justificación.....                                   | 2    |
| 1.3 Trabajos previos.....                                | 3    |
| 1.4 Objetivo general.....                                | 3    |
| 1.5 Objetivos específicos .....                          | 3    |
| 2. Marco teórico conceptual. ....                        | 4    |
| 2.1 Recarga natural.....                                 | 4    |
| 2.2 Recarga artificial.....                              | 4    |
| 2.2.1 Tipos de recarga artificial.....                   | 5    |
| 2.2.1.1 Balsas de infiltración.....                      | 5    |
| 2.2.1.2 Pozos de infiltración.....                       | 6    |
| 2.2.1.3 Canales de infiltración.....                     | 6    |
| 2.3 Monitoreo de la calidad del agua subterránea .....   | 6    |
| 2.4 Zona no saturada o zona vadosa .....                 | 7    |
| 2.4.1 Transporte de solutos en la zona no saturada ..... | 8    |
| 3. Medio Físico.....                                     | 10   |
| 3.1 Zona de estudio.....                                 | 10   |
| 3.1.1 Situación administrativa del acuífero.....         | 11   |
| 3.1.2 Hidrografía .....                                  | 11   |
| 3.1.3 Fisiografía y Geomorfología.....                   | 12   |
| 3.1.4 Clima.....   | 12   |
| 3.1.5 Geología .....                                     | 13   |
| 3.1.6 Edafología.....                                    | 14   |
| 3.1.7 Hidrogeología.....                                 | 16   |



|   |    |
|---|----|
| 4. Metodología.....                                       | 18 |
| 4.1 Caracterización de suelo.....                         | 18 |
| 4.2 Columnas de suelo.....                                | 18 |
| 4.3 Análisis químicos del lixiviado.....                  | 20 |
| 4.4 Otros análisis.....                                   | 20 |
| 5. Discusión de resultados.....                           | 22 |
| 5.1 Caracterización de material.....                      | 22 |
| 5.1.1 Punto de muestreo 1 (TA01).....                     | 22 |
| 5.1.2 Punto de muestreo 2 (TA02).....                     | 23 |
| 5.2 Fluorescencia de rayos X (XRF).....                   | 24 |
| 5.3 Cloro en suelo.....                                   | 26 |
| 5.4 Difracción de rayos X (XRD).....                      | 27 |
| 5.5 Hidrogeoquímica.....                                  | 30 |
| 5.6 Balance iónico.....                                   | 33 |
| 5.7 Diagrama de Piper.....                                | 35 |
| 5.8 Diagrama de Stiff.....                                | 36 |
| 5.9 Seguimiento del experimento de columnas de suelo..... | 38 |
| 6. Conclusiones y Recomendaciones.....                    | 41 |
| 7. Referencias.....                                       | 42 |



## Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| <b>Tabla 1:</b> Parámetros determinados, así como la norma mexicana e instrumentos utilizados.....  | 20 |
| <b>Tabla 2:</b> Resultado de análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo. ....   | 25 |
| <b>Tabla 3:</b> Resultado de análisis de Cloruros totales de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo.....  | 26 |
| <b>Tabla 4:</b> Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA01-E2.....   | 28 |
| <b>Tabla 5:</b> Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA02-E1.....   | 28 |
| <b>Tabla 6:</b> Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA02-E2.....   | 29 |
| <b>Tabla 7:</b> Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA02-E3.....   | 29 |
| <b>Tabla 8:</b> Resultados de análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo (TA01 es el punto de muestreo, E1 corresponde al estrato 1) (se encuentran subrayados los parámetros que se encuentran por encima de la NOM-127-SSA1-1994) .....   | 31 |
| <b>Tabla 9:</b> Resultados de análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo.....   | 31 |
| <b>Tabla 10:</b> Criterios de aceptación de análisis físico-químico de agua por SMWW_1000-3000.....   | 34 |
| <b>Tabla 11:</b> Resultado, sumatorias y porcentajes de cationes obtenidos en el análisis físico-químico del experimento de columnas de suelo. ....   | 34 |
| <b>Tabla 12:</b> Resultado, sumatorias y porcentajes de aniones obtenidos en el análisis físico-químico del experimento de columnas de suelo. ....  | 34 |
| <b>Tabla 13:</b> Resultado del método de balance iónico o porcentaje de error del análisis físico-químico del experimento de columnas de suelo. ....  | 34 |
| <b>Tabla 14:</b> Resultados del seguimiento del análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo (A1 corresponde al análisis del lixiviado 1) (se encuentran subrayados los parámetros que se encuentran por encima de la NOM-127-SSA1-1994) .....  | 39 |
| <b>Tabla 15:</b> Resultados del seguimiento del análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo. ....  | 39 |
| <b>Tabla 16:</b> Comparación de los resultados del seguimiento del análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo con la calidad del agua subterránea de la zona de estudio y su tendencia a mejorar o bajar la calidad de cloruros, nitratos, sulfatos, flúor y arsénico y si esta es permisible o no para la Norma Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) (mejorar = M, bajar = B, Permisible = P, No permisible = NP)..... | 40 |



## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1:</b> Localización de las Balsas en el Acuífero Tabalaopa-Aldama. Los recuadros de colores 1,2,3 y 4 corresponden a la ubicación propuesta de las balsas de infiltración.....                             | 10 |
| <b>Figura 2:</b> Clima de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....  | 13 |
| <b>Figura 3:</b> Geología de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....   | 14 |
| <b>Figura 4:</b> Edafología de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....   | 15 |
| <b>Figura 5:</b> Hidrogeología de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....  | 17 |
| <b>Figura 6:</b> Muestra en proceso utilizando la pistola de fluorescencia de rayos X modelo X-MET7000. .25  |    |
| <b>Figura 7:</b> Difractograma de la muestra TA01-E2 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....  | 27 |
| <b>Figura 8:</b> Difractograma de la muestra TA02-E1 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....  | 28 |
| <b>Figura 9:</b> Difractograma de la muestra TA02-E2 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....  | 29 |
| <b>Figura 10:</b> Difractograma de la muestra TA02-E3 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.....   | 29 |
| <b>Figura 11:</b> Disponibilidad relativa de elementos conforme el pH (mientras más gruesa sea la barra del elemento más disponibilidad de minerales) (Kuhns, 1985).....   | 33 |
| <b>Figura 12:</b> Diagrama de Piper de las muestras de lixiviado del experimento de columnas de suelo de los estratos obtenidos en el área de estudio del Acuífero Tabalaopa-Aldama.....                             | 36 |
| <b>Figura 13:</b> Diagramas de Stiff de las muestras de lixiviado del experimento de columnas de suelo de los estratos obtenidos en el punto de muestreo 1 en el área de estudio del Acuífero Tabalaopa-Aldama. .... | 37 |
| <b>Figura 14:</b> Diagramas de Stiff de las muestras de lixiviado del experimento de columnas de suelo de los estratos obtenidos en el punto de muestreo 2 en el área de estudio del Acuífero Tabalaopa-Aldama. .... | 37 |
| <b>Figura 15:</b> Diagrama de Stiff del blanco del experimento de columnas de suelo. ....  | 37 |



## 1. Generalidades

### 1.1 Introducción

El aprovechamiento del agua subterránea produce beneficios económicos y sociales, sin embargo, la sobreexplotación de un acuífero genera un deterioro apreciable en la calidad física y química del agua subterránea. Generalmente, la acumulación de minerales y/o salinización en el acuífero y la zona no saturada se originan por acciones artificiales, aunque a veces tiene un origen natural como es la disolución en minerales ricos en flúor, arsénico o metales pesados. Otras causas pueden ser los cambios en la recarga derivados de las actividades humanas y la posibilidad de modificarla por métodos artificiales; estos cambios en la calidad del agua son debidos a la mezcla de diferentes tipos de familias de agua que constituyen factores importantes que deben considerarse al evaluar consecuencias indeseables (Auge, 2006). El factor geológico, especialmente la mineralogía de la cual proviene, así como los factores climáticos, son determinantes en los procesos que provocan la dispersión de estos residuos y sus lixiviados al entorno (Romero *et al.*, 2008).

Existen regiones en la República Mexicana en las que por las características geológicas prevalentes, el agua en sus acuíferos contiene arsénico y flúor disueltos en el agua. Se han detectado concentraciones por arriba de los límites que marcan los correspondientes criterios de calidad del agua, arsénico y/o fluoruros en acuíferos de los estados de Aguascalientes, Coahuila, Chihuahua, Durango, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, San Luis Potosí, Sonora y Zacatecas, principalmente (Vega, 2002). En el estado de Chihuahua uno de los problemas actuales de salud que atañe a los pobladores del valle del acuífero Tabalaopa-Aldama es la contaminación por arsénico en el agua subterránea, la cual se le atribuye a las arcillas depositadas en el abanico aluvial de la Sierra del Cuervo (Reyes *et al.*, 2013). Ya que en este acuífero se encuentran algunas baterías de pozos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento (JMAS) con el fin de abastecer de agua a la Ciudad de Chihuahua (CONAGUA, 2015), se han realizado estudios de modelación matemática, geofísica, calidad y disponibilidad de agua, realizados por particulares, por la



UACH y CONAGUA desde el 2008 hasta el 2016; sin embargo no se ha realizado una evaluación o caracterización fisicoquímica a detalle de los sedimentos que componen este acuífero granular.

Partiendo de la elaboración de columnas empacadas de suelo como metodología de transporte de solutos en suelos saturados, por la aplicación de agua destilada se obtiene un lavado de sales y minerales de los núcleos (Dontsova, 2006; Hernández, 2013). La cantidad de agua necesaria para lixiviar las sales solubles es un factor importante que rige la recuperación de suelos salinos, utilizando curvas de lixiviación que han demostrado describir adecuadamente la cantidad de agua requerida para retirar sales en el suelo a una profundidad determinada (Dieleman, 1977). Un factor importante es el comportamiento físico de los suelos durante la lixiviación. Los suelos afectados por salinidad en las regiones áridas y semiáridas por la alta evaporación invariablemente contienen grandes cantidades de sales solubles neutras en la capa superior del suelo, predominantemente el NaCl, esto resulta en una adsorción de sodio alta de la solución del suelo (Khosla, 1979; Mata, 2014).

Los experimentos de columnas pueden establecerse en laboratorio bajo condiciones controladas; la columna empacada permite diferenciar los efectos de los procesos físicos respecto a los efectos de los procesos químicos sobre el transporte de solutos. Por otra parte, evaluar el efecto de la estructura del suelo sobre el transporte de solutos y por tanto valorar una disolución de minerales en un lixiviado (Raymundo, 2008).

## **1.2 Justificación**

Como parte de las actividades ligadas al proyecto integral WWF-UACH “*Estudio de Almacenamiento, inducción y recarga de agua de lluvia en acuíferos de Chihuahua, Chih, México*” se decidió realizar un estudio de calidad del agua mediante experimentos de lixiviación en columnas de suelo. Es importante caracterizar el material de la zona no saturada pues esta puede funcionar como zona de amortiguación para atenuar la acidez, el



contenido de metales y de algunas otras sustancias perjudiciales o para determinar zonas que supongan un riesgo potencial para la salud humana.

### **1.3 Trabajos previos**

Dentro de la actividad de revisión de información se pudo tener acceso a los siguientes trabajos previos:

1. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Tabalaopa-Aldama (0835), estado de Chihuahua, CONAGUA (2015)
2. Diseño de columnas de suelo para experimentos de lixiviación en materiales del acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua, Chih.; México, Ana Armendáriz (2016)
3. Caracterización hidrogeológica de la porción NW del acuífero Tabalaopa-Aldama para emplazar una obra de recarga artificial con agua de lluvia, Rodrigo De la Garza (2015)
4. Construcción de un modelo físico para simular la recarga artificial de la porción noroeste del acuífero Tabalaopa – Aldama, Chihuahua, México, Miguel Ángel Mezquitic (2015)
5. Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria, CONAGUA y UACH (2012)
6. Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, México: Contaminant levels, potential sources, and co-occurrence, Reyes Gómez V. M. (2013)

### **1.4 Objetivo general**

Identificar la calidad de agua que se va a infiltrar en el proyecto de recarga del acuífero Tabalaopa-Aldama.

### **1.5 Objetivos específicos**

- a) Implementar columnas de suelo con material proveniente del acuífero Tabalaopa-Aldama para estudios de lixiviación.



- b) Evaluar concentraciones de cationes ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{K}^{+2}$ ) y aniones ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^{-2}$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$  y  $\text{NO}_3^-$ ) en el lixiviado de suelo.
- c) Evaluar contenido de F y As en el lixiviado del suelo.
- d) Realizar la clasificación físico-química del suelo.

## 2. Marco teórico conceptual

### 2.1 Recarga natural

La recarga natural es una etapa dentro del ciclo hidrológico, generado como consecuencia de la diferencia existente entre entradas de agua al suelo (precipitación e infiltración desde ríos, lagos o cualquier otra masa de agua) y salidas (evapotranspiración y escorrentía). En climas templados húmedos la recarga natural puede suponer de un 30% a un 50% de la precipitación, en el clima mediterráneo ronda entre un 10% y 20%, mientras que en climas secos no pasa de un 2% (pudiendo incluso ser nulo) (Sukia, 2009).

### 2.2 Recarga artificial

La recarga artificial es el proceso de regeneración de reservas de aguas subterráneas añadiendo agua al almacenamiento del acuífero; puede ser no planeada en el caso de filtraciones de canales, tuberías u otros conductos (Roscoe Moss, 1990). Una recarga planeada es la que se almacena agua subterránea para el consumo futuro, involucra procurar o coleccionar agua para la recarga, seleccionando el método de recarga, y construyendo los medios que se van a emplear.

Los principales objetivos de un programa de recarga artificial son:

1. Conservación de recursos de agua
2. Mejor uso de los depósitos de agua subterránea al recargar puntos de demanda
3. Eliminación de pérdida por evaporación y otros efectos indeseables asociados con reservas superficiales
4. Incrementar el suministro de agua subterránea





En adición a estos objetivos generales, hay varios problemas especiales que pueden ser mitigados o superados por el uso de recargas artificiales. Por ejemplo, la recarga artificial es usada para bloquear intrusión salina en zonas costeras, de manera que el agua fresca inyectada en los pozos forma una barrera paralela a la costa.

### *2.2.1 Tipos de recarga artificial*

Partiendo de que los aspectos geológicos, hidrológicos y operacionales de un proyecto, son necesarios para seleccionar el método de recarga artificial adecuado, éstos incluyen límites de acuíferos, entradas y salidas de aguas subterráneas y superficiales, capacidad de almacenamiento, porosidad, conductividad hidráulica y fuentes disponibles de agua. Los acuíferos más apropiados para recarga artificial pueden absorber grandes cantidades de agua sin liberarla rápidamente. Esto implica una alta conductividad hidráulica vertical con un valor horizontal moderado. Una recarga artificial exitosa requiere que el acuífero subyacente no este confinado con un nivel estático lo suficientemente bajo para permitir almacenamiento adicional.

Como es sabido en cuencas aluviales no consolidadas, se contienen sedimentos gruesos y canales de ríos enterrados, también representan condiciones favorables para recarga artificial, los métodos más comunes son:

- Balsas de infiltración
- Pozos de infiltración
- Canales de infiltración

#### *2.2.1.1 Balsas de infiltración*

Este método consiste en distribuir agua sobre una gran área de superficie, permitiendo que se hunda al acuífero. Los términos infiltración o percolación describen el movimiento vertical del agua a través de zonas no saturadas (Roscoe Moss, 1990). El rango de infiltración es definido como el volumen de agua que se mueve hacia abajo durante una



unidad de tiempo a través de una unidad de área y es expresado en metros cúbicos por día (Roscoe Moss, 1990).

La calidad del agua es muy importante para una operación de recarga en balsas de infiltración. El material fino en el agua inyectada tiende a tapar las zonas de infiltración. Bacterias y algas pueden producir los mismos efectos.

#### *2.2.1.2 Pozos de infiltración*

Los pozos de infiltración requieren menos superficie que el método de balsa, pues la infiltración toma lugar primariamente a través de los muros del pozo, debido a la conductividad hidráulica horizontal, siendo mayor que la conductividad hidráulica vertical. El método de pozo evita problemas de evaporación asociados a la distribución. Su uso también es ventajoso donde hay arcillas u otras capas impermeables que evitan la percolación. Un pozo es menos susceptible a obstrucciones por sedimentos ya que éstos se asientan en el fondo, dejando los lados libres para la infiltración.

#### *2.2.1.3 Canales de infiltración*

Consiste en un canal natural que es mejorado para incrementar su capacidad de infiltración. Esto se hace por medio de raspado, nivelado, ampliación, apertura de zanjas y construyendo diques de arena en la cama del río. Se incrementa el área de superficie sobre la que el agua se infiltra, reduciendo la velocidad del agua y permitiendo más tiempo para la infiltración (Roscoe Moss, 1990).

### **2.3 Monitoreo de la calidad del agua subterránea**

El monitoreo de un acuífero y de sus tendencias de calidad son básicos para lograr una gestión eficaz del agua subterránea y cumplir con la principal meta de gestión. El monitoreo comprende la recolección, análisis y almacenamiento de un número determinado



de muestras en forma regular, conforme a circunstancias y objetivos específicos (Tuinhof, 2006).

*Pozos de producción:* Cuando se perfora un pozo de producción, se obtienen datos básicos de referencia sobre la cantidad del agua subterránea. Es más difícil interpretar datos obtenidos de pozos cuando ya están en operación, ya que los niveles del agua subterránea se ven afectados por el ciclo de abatimiento-recuperación, y la calidad del agua en la muestra bombeada refleja la mezcla variable de aguas que provienen de un amplio rango de profundidades del acuífero con diferentes tiempos de residencia (Tuinhof, 2006).

*Pozos de observación:* Constituyen estaciones dedicadas exclusivamente al monitoreo, y se ubican y diseñan para detectar cambios potenciales del flujo y de la calidad del agua subterránea. Sus parámetros de diseño incluyen: la profundidad de la rejilla de entrada, la frecuencia de las mediciones (en caso de no ser continuas) y los parámetros de calidad seleccionados. Con objeto de contrarrestar la presencia generalizada de variaciones de profundidad en la carga hidráulica y/o la calidad del agua (Tuinhof, 2006).

*Red de monitoreo:* está formada normalmente por un conjunto de pozos de observación acoplado con una selección de pozos de extracción. Dicha red se diseña de forma que se tenga acceso a los datos requeridos del recurso de agua subterránea (Tuinhof, 2006).

## **2.4 Zona no saturada o zona vadosa**

La zona no saturada también es importante como zona de amortiguación para atenuar la acidez, el contenido de metales y de algunas otras sustancias perjudiciales (Edmunds, 2004), principalmente bajo las propiedades de las arcillas; adsorción iónica, aniónica catiónica y de gases. Dentro de la zona no saturada, la franja edáfica o zona radicular (hasta donde penetran las raíces) es la más efectiva como filtro natural, debido a



su alto contenido en materia orgánica y fuerte actividad biológica. Los compuestos solubles e insolubles ( $\text{Cl}$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{F}$ ,  $\text{As}$ , cationes y aniones) no son retenidos en la zona no saturada si existe una infiltración efectiva, aun cuando ésta tenga baja permeabilidad y un espesor considerable (Auge, 2006).

En todo caso, al medir la calidad del suelo es importante evaluar las propiedades físicas y químicas. Las propiedades físicas incluyen densidad aparente, contenido de agua y velocidad de drenaje. Las propiedades químicas incluyen pH, conductividad eléctrica (C.E.) contenido de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y mineralogía. Estos indicadores, fueron diseñados como instrumento para monitorear la calidad del suelo a lo largo del tiempo, y para diagnosticar posibles problemas debidos al uso y manejo de las tierras (USDA, 1999). Por otro lado, las primeras sustancias responsables del sabor del agua subterránea son las sales minerales (iones) que forman parte de su composición natural. Así, se encuentran siempre en el agua cloruros, bicarbonatos y sulfatos (aniones), sodio, calcio y magnesio (cationes); estos compuestos naturales son los responsables del gusto propio del agua. El cloro residual también puede dar al agua un gusto y olor característicos.

#### *2.4.1 Transporte de solutos en la zona no saturada*

El transporte de solutos a través de la zona no saturada puede verse afectada por un gran número de factores, tales como las propiedades físicas y químicas del suelo, la tasa de extracción de agua y soluto por las plantas y la tasa de aplicación de agua y soluto (Domenico & Schwartz, 1990). La distribución espacial de un soluto reactivo y su movimiento a través del medio subterráneo están controlados por procesos hidrodinámicos de transporte de masa (advección, convección, difusión y dispersión) y procesos químicos asociados a reacciones de diversa naturaleza tales como la formación de complejos, reacciones ácido-base, de hidrólisis, disolución-precipitación, óxido-reducción, adsorción e intercambio iónico (Samper & Ayora, 1993). Existe una gran variedad de modelos



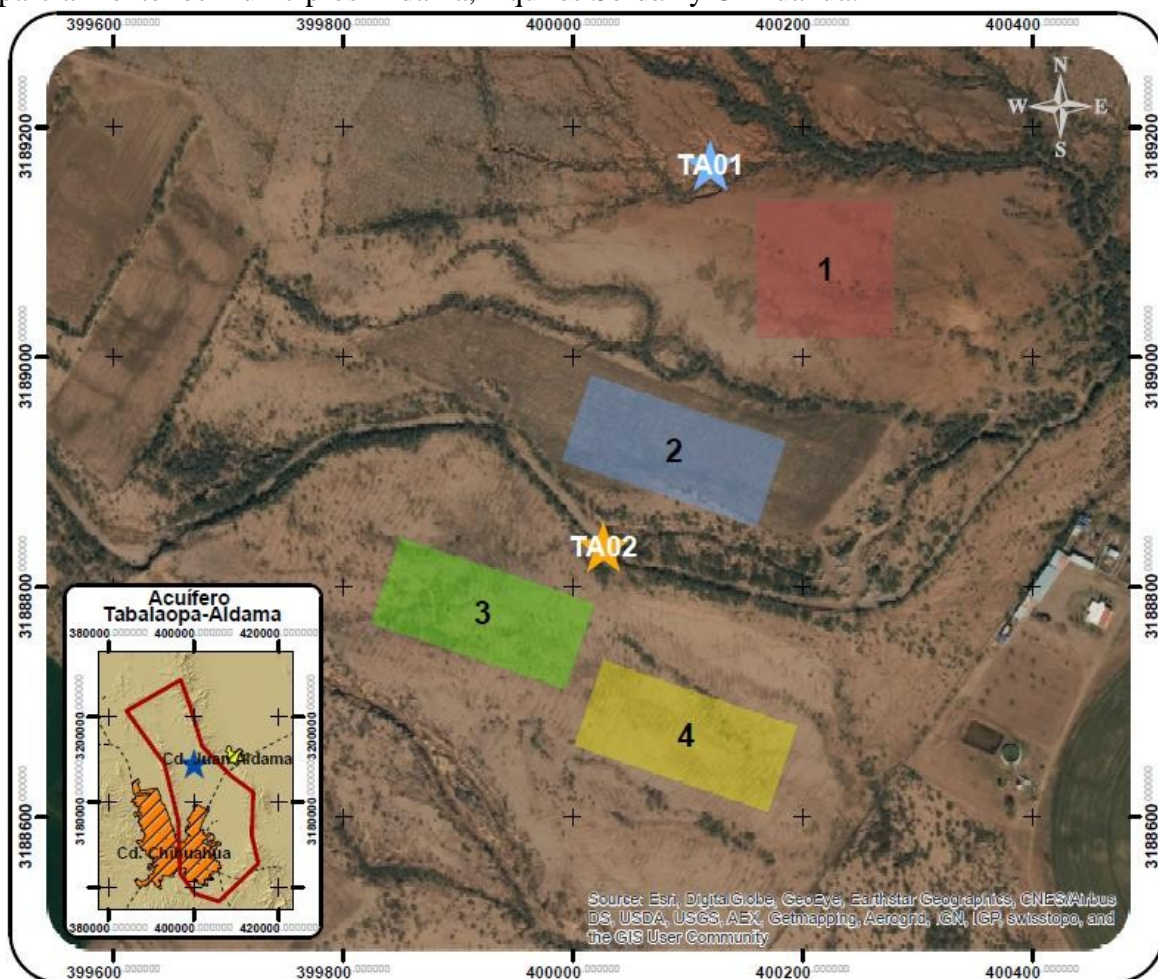
FACULTAD DE INGENIERÍA

cuantitativos, sin embargo, su principal limitante es debido a la heterogeneidad de los materiales granulares (Dentz *et al.*, 2003).

### 3. Medio Físico

#### 3.1 Zona de estudio

El Acuífero Tabalaopa-Aldama se localiza en la porción central del estado de Chihuahua, entre los paralelos  $28^{\circ} 32' 30''$  y  $29^{\circ} 0' 0''$  de latitud norte y los meridianos  $106^{\circ} 10' 0''$  y  $105^{\circ} 52' 0''$  de longitud oeste, cubriendo una superficie de  $728 \text{ km}^2$ . Colinda al norte con el acuífero Laguna El Diablo y Laguna de Hormigas, al oriente con Aldama-San Diego, al occidente con el acuífero Chihuahua-Sacramento, mientras que al sur colinda con el acuífero Villalba, todos en el estado de Chihuahua. Geopolíticamente el acuífero abarca parcialmente los municipios Aldama, Aquiles Serdán y Chihuahua.



**Figura 1:** Localización de las 4 balsas de infiltración propuestas en el Acuífero Tabalaopa-Aldama (recuadros en colores) y de los puntos de muestreo de suelo para este estudio.



### 3.1.1 *Situación administrativa del acuífero*

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca Río Bravo y es jurisdicción territorial de la Dirección Local en Chihuahua. La porción central de su superficie del acuífero está sujeta a las disposiciones del “*Decreto que establece veda para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la región circunvecina de Villa Aldama, Chih.*”, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de diciembre de 1953. Esta veda se clasifica como tipo III que permite extracciones limitadas para usos domésticos, industriales, de riego y otros. De acuerdo con la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua (2008), los municipios Aldama y Aquiles Serdán se clasifican como zona de disponibilidad 3 y Chihuahua como zona 5 donde el principal usuario es el público – urbano (CONAGUA, 2015).

### 3.1.2 *Hidrografía*

El acuífero Tabalaopa-Aldama se encuentra dentro de la Región Hidrológica 24, Bravo-Conchos, localizada en la Mesa del Norte que se localiza en los estados de Chihuahua, Durango y Coahuila. Se considera la región hidrológica de mayor relevancia ya que incluye al río Conchos como la corriente más importante del estado. La zona del acuífero se localiza dentro de la Cuenca Río Conchos-Presa El Granero, dentro de la Subcuenca río Chuvíscar (INEGI, 2003).

Las corrientes superficiales que se presentan la zona del acuífero son efímeras y estacionales, en periodos de estiaje no existe flujo en los arroyos, mientras que en el río Chuvíscar existe un escurrimiento prácticamente continuo, debido a la descarga de aguas tratadas que son arrojadas por plantas de tratamiento.

Como consecuencia del asentamiento urbano, la región cuenta con importantes obras de infraestructura hidráulica, como la planta de tratamiento de aguas residuales sur y la red de agua potable y alcantarillado que cubre la mayor parte de la zona urbana. Existe también la batería de pozos de la Junta Municipal de Agua y Saneamiento.



### 3.1.3 *Fisiografía y Geomorfología*

Fisiográficamente la zona de interés se encuentra localizada en la Provincia de Sierras y Cuencas o de *Basin and Range* (Raisz & Erwin, 1964). Esta provincia se caracteriza por presentar extensas sierras alargadas con una orientación principal NNW-SSE que rodean a amplios valles tectónicos con amplios rellenos aluviales, denominados por los españoles como Bolsones.

Con respecto a su Geomorfología, la zona se encuentra en una etapa de madurez (dentro del ciclo de Davis) con un avanzado grado de denudación de las estructuras y drenaje bien integrado. El drenaje dendrítico-paralelo es el más abundante, mientras que el tipo radial se presenta en la sierra El Cuervo, El Coronel y Cerro Grande.

Las zonas bajas del acuífero se consideran zonas de recarga difusa debido a que generalmente los materiales de relleno están constituidos de arenas de grano fino intercaladas con abundantes arcillas y limos.

### 3.1.4 *Clima*

Dentro de la clasificación de INEGI (2003), el área de estudio presenta un clima BSohW(w) seco semicálido (lluvias en verano), este tipo de clima presenta una temperatura media anual mayor a 18°C, con inviernos frescos, también se observa un tipo de clima BSokW(w) seco templado (lluvias en verano) a 1 km aproximadamente de las balsas de infiltración el cual tiene una temperatura que varía de entre los 12 y los 18°C (CONAGUA, 2015).



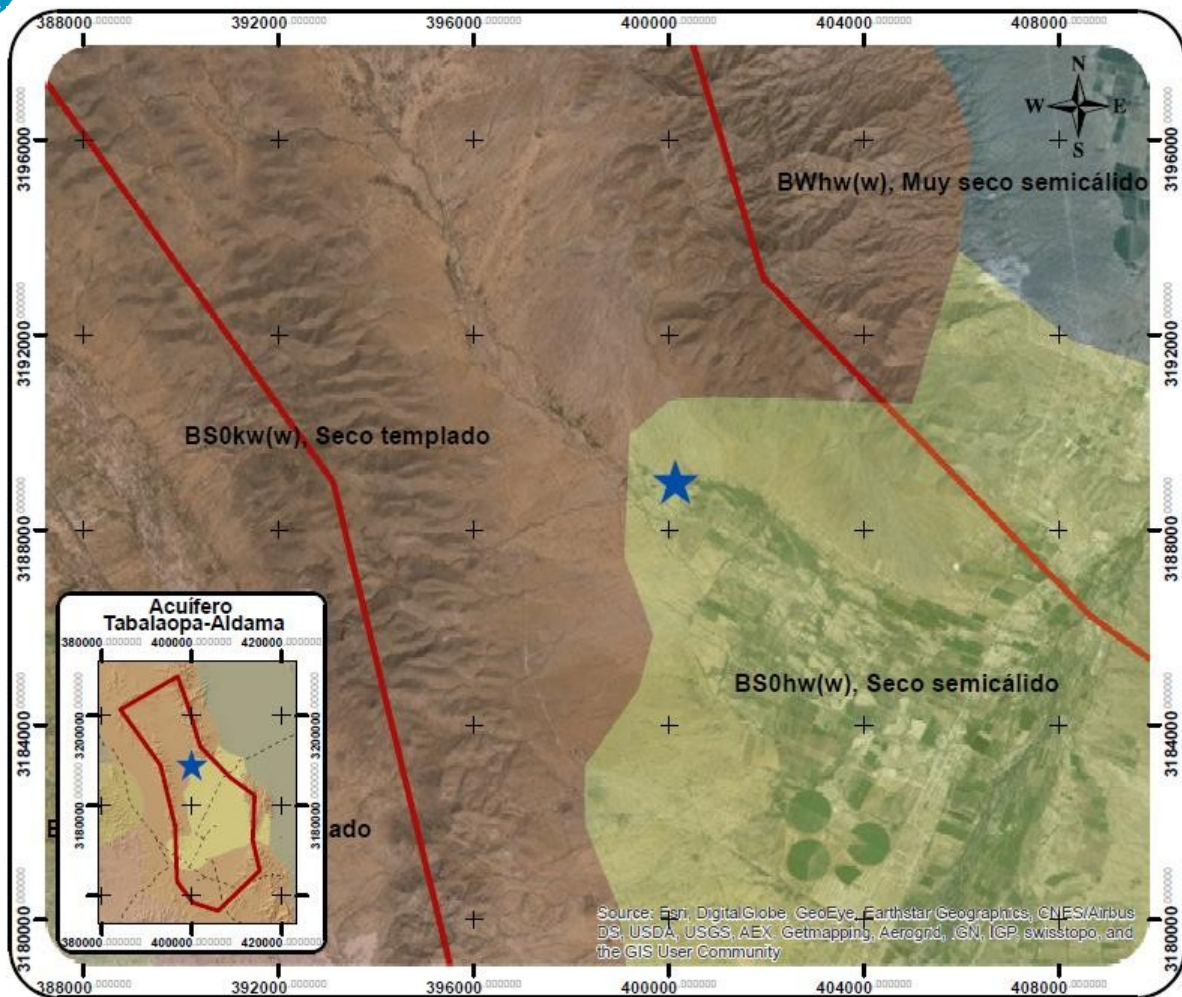


Figura 2: Clima de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

### 3.1.5 Geología

Las rocas del basamento han sido sometidas a fases compresivas y distensivas que conforman grandes bloques emergidos y/o hundidos que en ocasiones denotan movimientos horizontales de transcurrancia o cabalgamiento, controlando la sedimentación y sus posteriores deformaciones (CONAGUA, 2015). Las unidades recientes están compuestas por depósitos conglomeráticos y aluviales. Estructuralmente el área presenta abundantes fallas normales de orientación noroeste-sureste, las cuales afectan a toda la secuencia estratigráfica, este fallamiento es producto del evento distensivo de Cuencas y Sierras, como se explicó anteriormente en el apartado 3.1.3 (CONAGUA, 2015).

El basamento y fronteras al flujo subterráneo están constituidos por las mismas rocas volcanoclásticas, cuando no presentan permeabilidad secundaria, y por la secuencia metasedimentaria de la formación Rara, cuyos afloramientos se presentan en la base de la sierra El Cuervo, ubicada al noroeste de Ciudad Aldama (CONAGUA, 2015).

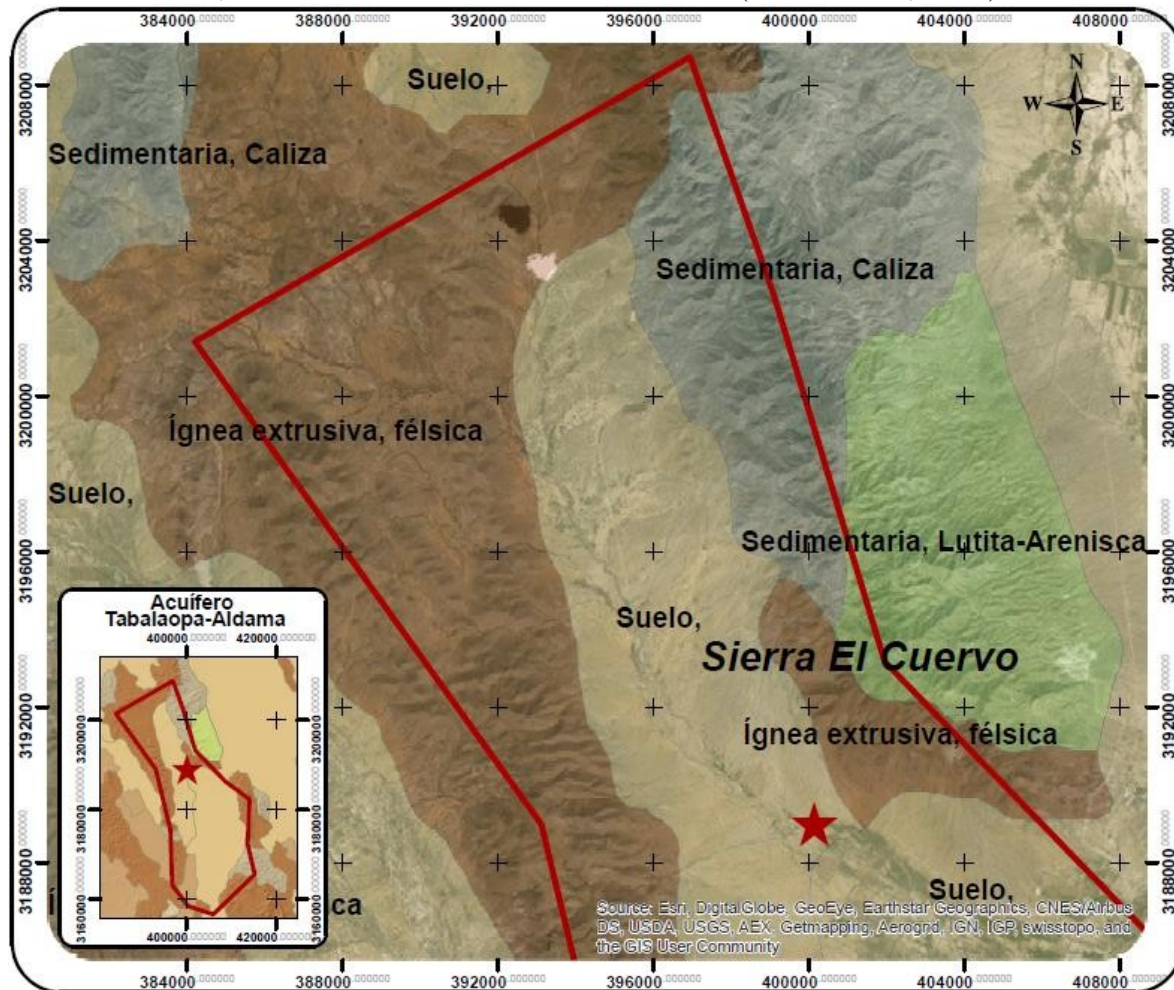


Figura 3: Geología de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

### 3.1.6 Edafología

Si se considera el proceso de fragmentación en las zonas altas del acuífero, seguido por el transporte de sedimentos a la zona del valle donde se depositan los fragmentos más finos, asintiendo así de una pendiente mayor a una menor desde las sierras a la zona del valle del acuífero.

En estudios anteriores se ha comprobado la concentración de arsénico en sedimentos del Acuífero Tabalaopa-Aldama. Los resultados demostraron que la geología del que provienen estos suelos contienen concentraciones de arsénico generalmente en suelos riolíticos del valle cercanos al cauce principal (Reyes *et al.*, 2013).

La zona de estudio se encuentra en la parte baja de la sierra El Cuervo, muy cerca de su abanico aluvial, a escasos metros del cauce principal y además una de las balsas esta en contacto con un suelo regosol aparentemente de origen riolítico.

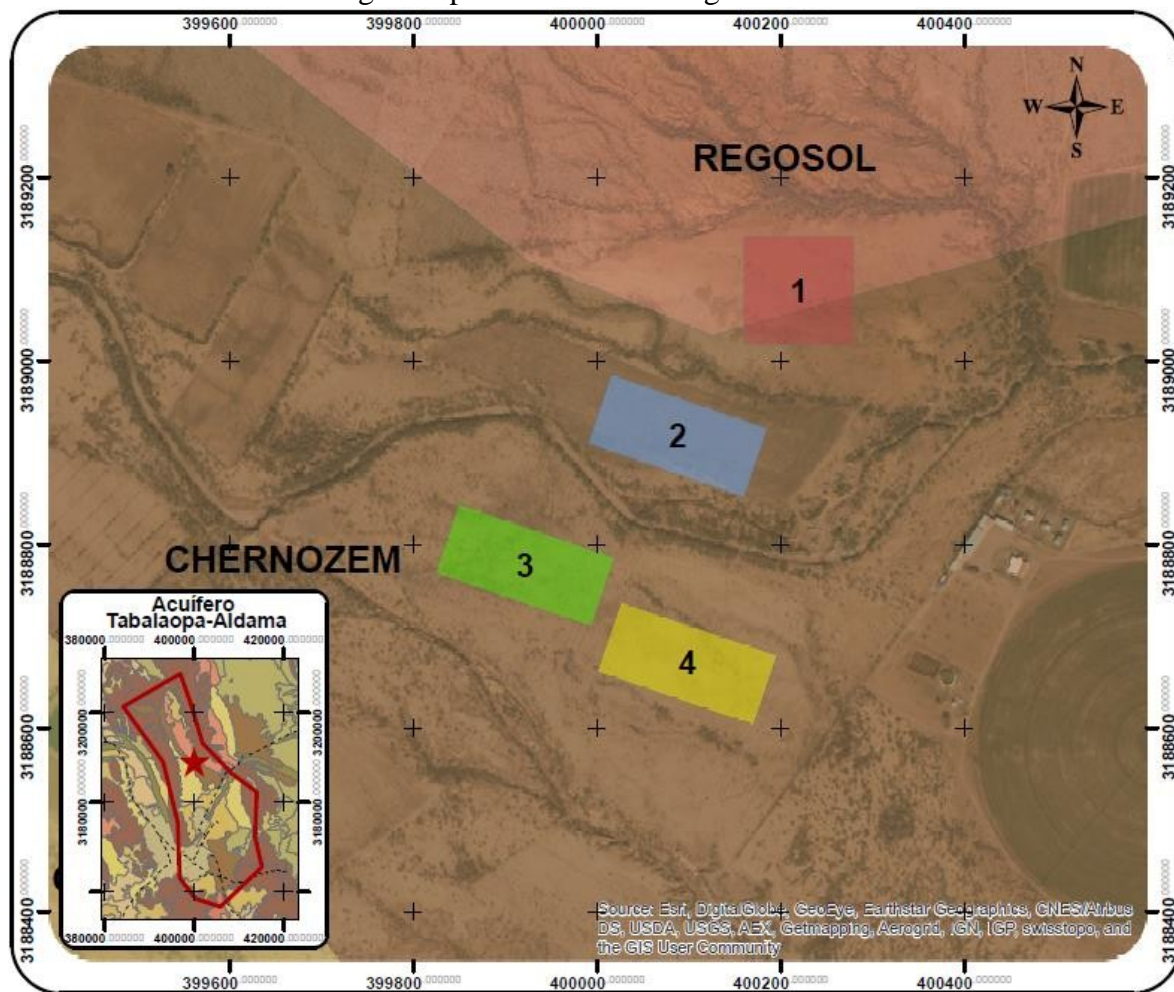


Figura 4: Edafología de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.



### 3.1.7 Hidrogeología

El Acuífero Tabalaopa-Aldama es de tipo libre, presenta una permeabilidad que varía de media a baja y se aloja en sedimentos aluviales depositados en el centro del valle, constituidos por arenas intercaladas con arcillas y limos estratificados, cuyo espesor puede alcanzar los 800 metros (CONAGUA, 2015). La fuente principal de recarga es el agua de lluvia que se infiltra en las zonas topográficamente altas, una menor fuente de recarga está representada por infiltración vertical del agua de lluvia que se precipita en el valle y por los retornos de riego agrícola (CONAGUA, 2015).

Dentro de la geología que interactúa con la zona de estudio se encuentran rocas de tipo sedimentarias e ígneas, de las cuales predominan las lutitas, calizas y tobas riolíticas. La estratigrafía de la sierra El Cuervo se caracteriza por la intensa deformación de las unidades y por sus afloramientos de rocas antiguas con edades de 1025 y 1037 millones de años, se encuentran también minerales como arsenopirita y fluoroapatita (Reyes *et al.*, 2010). Para este estudio, en la figura 5 se puede observar que existen escurrimientos superficiales y muy posiblemente subterráneos que se originan de la sierra El Cuervo y fluyen directamente hacia el área de estudio.

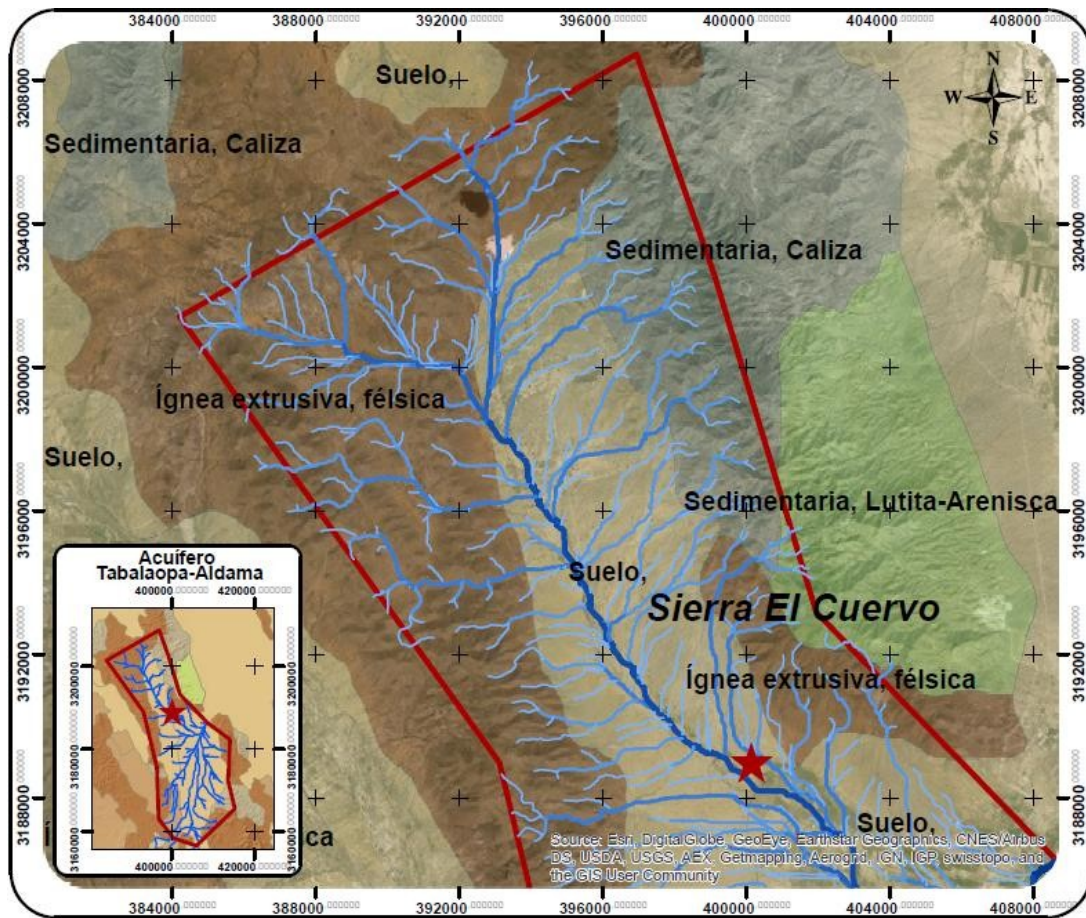


Figura 5: Hidrogeología de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.



## 4. Metodología

Los experimentos consistieron en la obtención de lixiviados de las columnas de suelo caracterizado en la porción noroeste del acuífero Tabalaopa-Aldama. Primeramente, se caracterizó física y químicamente el material con el cual se llenaron las columnas. Posteriormente se llevaron a cabo los experimentos de lixiviación y los lixiviados fueron analizados químicamente. Los análisis realizados son descritos a continuación con mayor detalle.

### 4.1 Caracterización de suelo

La caracterización física del suelo se enfocó en pruebas granulométricas. La caracterización química conllevó una serie de mediciones con diferentes técnicas instrumentales tales como el uso de una pistola de Fluorescencia de Rayos X (XRF) y Difracción de Rayos X (XRD), en instalaciones del laboratorio de mecánica de suelos y de metalurgia de la Facultad de Ingeniería UACH y el laboratorio de rayos X del Centro de Investigación en Materiales Avanzados (CIMAV).

### 4.2 Columnas de suelo

El uso de columnas de suelo es un método sencillo para evaluar el transporte de solutos y algunos minerales (Sánchez *et al.*, 2012). Existen tres tipos de experimentos como los más comunes:

1. *Columna empacada*: Consiste en empacar homogéneamente suelo que ha sido pasado por una malla de determinado diámetro, a determinada densidad, en un tubo de vidrio o plástico. El diámetro de las partículas y la densidad del suelo en la columna son definidas en función de los intereses del estudio (tamaño y distribución de partículas y poros a estudiar).



2. *Columna inalterada*: Consiste en una columna de suelo que se extrae del campo con la mínima perturbación posible para preservar su estructura y su heterogeneidad. El diámetro y la longitud de la columna se definen a función de los intereses de estudio (White, 1998).

3. *Lisímetro*: es una versión más grande de una columna inalterada. Su diámetro puede ser arriba de 1 metro y su profundidad de 1 a 1.5 metros.

En los tres casos, el experimento consiste básicamente en inyectar una solución conteniendo un trazador del agua y del soluto de interés en la parte superior del suelo. En los experimentos en columnas empacadas y en columnas inalteradas, el desplazamiento del trazador y del soluto se realiza posteriormente a lo largo de la columna con un flujo de una solución que reproduce la solución del suelo a modo de no alterar las características físico-químicas en el interior de la columna. A la salida de la columna se colectan los lixiviados con cierta periodicidad y se determinan las concentraciones del trazador y del soluto. En el caso de los lisímetros, el desplazamiento del trazador y del soluto puede inducirse de la misma forma descrita para las columnas o bien se deja que ocurra naturalmente por efecto de la infiltración del agua de lluvia.

En esta tesis se utilizará el diseño de columnas elaborado por Armendáriz (2016) en su tesis "*Diseño de columnas de suelo para experimentos de lixiviación en materiales del acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua, Chih., México*". Los experimentos de columnas pueden establecerse en laboratorio, bajo condiciones controladas, las columnas empacadas permiten diferenciar los efectos de los procesos físicos respecto a los efectos de los procesos químicos sobre el transporte de solutos. Por otra parte, las columnas inalteradas permiten evaluar el efecto de la estructura natural del suelo sobre el transporte de solutos y por tanto valorar la distribución e interconexión de la porosidad del suelo alterado (Raymundo, 2008).

Podría existir un flujo a lo largo de la pared de la columna que debe ser verificado mediante el uso de un trazador para evitar efectos de borde, se puede aplicar silicona como sellador pared de una columna a intervalos apropiados (Weber & Peeper, 1982), se pueden



utilizar columnas de vidrio, de acero inoxidable, o de cloruro de polivinilo (PVC), se utilizan en los estudios de mayor escala.

### 4.3 Análisis químicos del lixiviado

Se realizaron en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería de la UACH donde se procedió a evaluar los siguientes parámetros (Tabla 1), además, en la misma tabla se presenta la norma y equipo utilizados. Para cada muestra de agua se determinaron: conductividad eléctrica, pH, bicarbonatos, carbonatos, nitratos, flúor, sulfatos, alcalinidad, cloruros, sodio, calcio, magnesio, potasio y arsénico.

**Tabla 1:** Parámetros determinados, así como la norma mexicana e instrumentos utilizados

| Parámetro                     | Norma                | Instrumento                    |
|-------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| pH                            | NMX-AA-008-SCFI-2011 | Thermo orion 3 star            |
| C.E                           | NMX-AA-093-SCFI-2000 | CORNING conductivity meter 441 |
| Alcalinidad                   | NMX-AA-036-SCFI-2001 | Titulación                     |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | NMX-AA-079-SCFI-2001 | HACH DR 5000                   |
| SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> | NMX-AA-074-SCFI-2014 | HACH DR 2500                   |
| Cl <sup>-</sup>               | NMX-AA-073-SCFI-2001 | Titulación                     |
| Na <sup>+</sup>               | NMX-AA-051-SCFI-2001 | Perkin elmer AAnalyst 200      |
| Ca <sup>+2</sup>              | NMX-AA-051-SCFI-2001 | Perkin elmer AAnalyst 200      |
| Mg <sup>+2</sup>              | NMX-AA-051-SCFI-2001 | Perkin elmer AAnalyst 200      |
| K <sup>+2</sup>               | NMX-AA-051-SCFI-2001 | Perkin elmer AAnalyst 200      |
| As                            | NMX-AA-051-SCFI-2001 | Perkin elmer AAnalyst 200      |
| F                             | NMX-AA-077-SCFI-2001 | Termo spectronic genesys 20    |

### 4.4 Otros análisis

Se complementó la caracterización física llevada a cabo en el trabajo de “*Construcción de un Modelo Físico para Simular la Recarga Artificial de la Porción Noroeste del Acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua, México*” (Mezquitic, 2015) con análisis de Fluorescencia de Rayos X (XRF) y Difracción de Rayos X (XRD). Los análisis químicos del agua fueron verificados por un balance iónico, posteriormente los datos fueron interpretados con el programa de cómputo Diagrammes, mediante el uso de





diagramas de Piper y Stiff; posteriormente se compararon los valores con la NOM-127-SSA1-1994 para determinar valores que suponen un riesgo para la salud humana.



## 5. Discusión de resultados

### 5.1 Caracterización de material

El muestreo se realizó a distintas profundidades, en dos distintos puntos representativos de la edafología superficial, recolectando en total 5 muestras de suelo de la zona de colocación de las balsas de infiltración dentro del acuífero Tabalaopa-Aldama.

Se muestrearon las zonas que se determinaron convenientes, se llevó a cabo con un pico con cubierta plástica, una pala de cubierta plástica y cubetas de plástico para la recolección. Posteriormente a esto se realizó la caracterización del material, conformado por sus análisis granulométrico, de limistes (líquido y plástico) y de contracción, éstos descritos en el trabajo de Miguel Mezquitic “*Construcción de un modelo físico para simular la recarga artificial de la porción noroeste del acuífero Tabalaopa – Aldama, Chihuahua, México*” en el apartado 3.4.2.3 con el fin de obtener su clasificación S.U.C.S.

Las pruebas de granulometría y límites de consistencia necesaria para la clasificación S.U.C.S de las muestras, fueron realizados en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería (UACH) (Mezquitic & Pinales, 2016).

#### 5.1.1 Punto de muestreo 1 (TA01)

La ubicación del primer punto de muestreo fue realizado en las coordenadas 400119, 3189167 (UTM Zona 13 Norte), como puede observarse en la figura 1. El tipo de suelo en este punto (regosol) es similar al que corresponde a aproximadamente el 70% del área total de la balsa “1”, ya que el otro 30% es de tipo chernozem. Cabe mencionar que el estrato 1 (TA01-E1), al tener una profundidad no mayor a 0.10m, se optó por omitir su caracterización de material, puesto que para la construcción de las balsas de infiltración será removido totalmente, sin embargo, si se tomó en cuenta en el experimento de columnas de suelo.



A continuación se muestra un resumen de los resultados de la caracterización de la muestra obtenida en el punto de muestreo de acuerdo a la metodología de las Normas M-MMP-1-02/03 y M-MMP-1-07/07.

Estrato 2 (TA01-E2).

Profundidad: 0.10m - 7m

Numero de golpes: 4/15/25/30

Observaciones: Consistencia muy firme

Clasificación S.U.C.S: CL- Arcilla de baja compresibilidad.

Granulometría:

- Gravas: 0
- Arenas: 10.1
- Finos: 89.9

#### 5.1.2 Punto de muestreo 2 (TA02)

La ubicación del segundo punto de muestreo (ver figura 1) fue realizado en las coordenadas 400026, 3188834 (UTM Zona 13 Norte). El tipo de suelo que le corresponde (chernozem) es similar al de las áreas en donde se pretende implementar las balsas 2, 3, 4 y parte de la balsa 1 como se mencionó anteriormente.

A continuación, se muestra un resumen de los resultados de la caracterización de cada una de las muestras obtenidas en el punto de muestreo de acuerdo a la metodología de las Normas M-MMP-1-02/03 y M-MMP-1-07/07.

Estrato 1 (TA02-E1).

Profundidad: 0m - 0.30m

Numero de golpes: 10/14/24/35

Observaciones: Consistencia dura.

Clasificación S.U.C.S: CL- Arcilla de baja compresibilidad.

Granulometría:

- Gravas: 0
- Arenas: 12.15
- Finos: 87.85

Estrato 2 (TA02-E2).

Profundidad: 0.30m - 0.50m

Numero de golpes: 8/14/25/37

Observaciones: Consistencia firme.



FACULTAD DE INGENIERÍA

Clasificación S.U.C.S: CL- Arcilla de baja compresibilidad.

Granulometría:

- Gravas: 0
- Arenas: 13.1
- Finos: 86.9

Estrato 3 (TA02-E3).

Profundidad: 0.50m - 2.30m

Numero de golpes: 4/15/25/30

Observaciones: Consistencia muy firme.

Clasificación S.U.C.S: CL- Arcilla de baja compresibilidad.

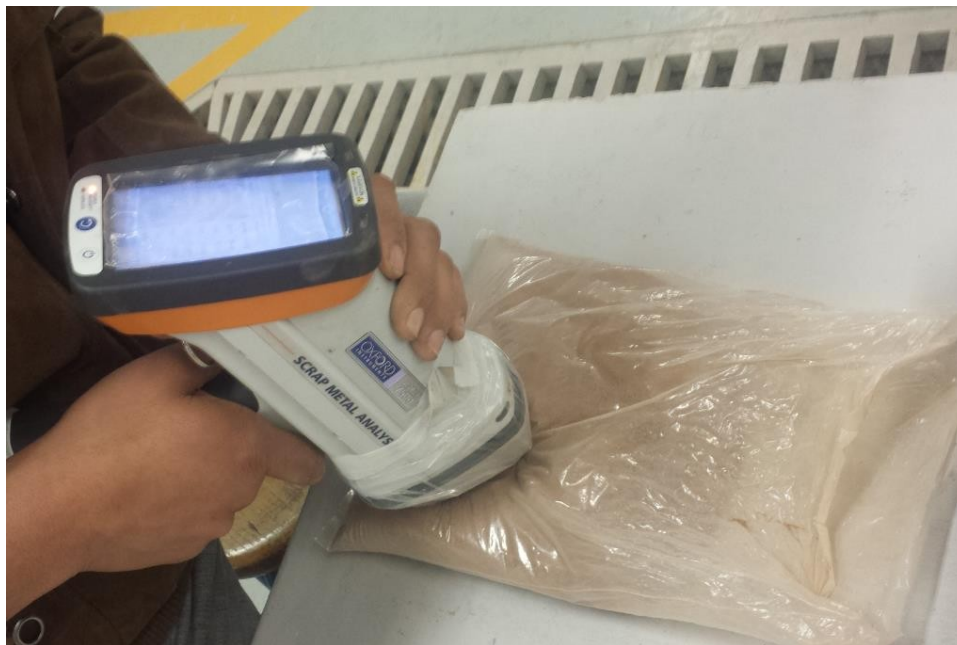
Granulometría:

- Gravas: 0
- Arenas: 18.35
- Finos: 81.65

Complementando con el trabajo de Miguel Mezquitic “*Construcción de un modelo físico para simular la recarga artificial de la porción noroeste del acuífero Tabalaopa – Aldama, Chihuahua, México*” se llega a la conclusión de que los suelos más someros cuentan con mayor porción de arcillas, Se observa también que entre más profundo es el estrato, este se torna más arenoso y gravoso, se puede apreciar que los estratos de los sondeos eléctrico vertical (SEV) de la zona de estudio descritos por Miguel Mezquitic coinciden con el muestreo de campo.

## **5.2 Fluorescencia de rayos X (XRF)**

El método de fluorescencia de rayos X funciona exponiendo una muestra a ser medida a unos rayos X primarios, donde los átomos de la muestra absorben energía de éstos y se alteran temporalmente, entonces emiten rayos X secundarios. Cada elemento químico emite rayos X a una energía única. Al medir la intensidad y características de la energía emitida se puede proveer un análisis cuantitativo y cualitativo en cuanto a la composición y densidad del material analizado (Oxford, 2013).



**Figura 6:** Muestra en proceso utilizando la pistola de fluorescencia de rayos X modelo X-MET7000.

Para el análisis se empleó el modelo portátil X-MET7000 y se utilizaron aproximadamente 500gr de muestra representativa de suelo de cada uno de los 5 estratos, con el fin de obtener la composición mineralógica que conforma dichos horizontes.

Las pruebas de Fluorescencia de rayos X (XRF) fueron realizados en el laboratorio de mineralogía de la Facultad de Ingeniería (UACH). A continuación, se muestran los resultados de fluorescencia de rayos X (XRF) de cada uno de los horizontes.

**Tabla 2:** Resultado de análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo

| Muestra | Fe%   | Si%   | Ti%  | Pd%  | Zr%  | Mn%  | Zn%  | Au%  | Sn%  | Y%   | Nb%  | Mo%  | Pb%  |
|---------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TA01-E1 | 64.73 | 22.99 | 2.69 | 2.19 | 2.18 | 1.8  | 0.91 | 0.8  | 0.78 | 0.52 | 0.31 | 0.12 | 0    |
| TA01-E2 | 69.61 | 20.72 | 2.58 | 1.87 | 1.82 | 1.24 | 0.87 | 0.68 | 0    | 0.41 | 0.21 | 0    | 0    |
| TA02-E1 | 61.96 | 25.79 | 3.05 | 2.43 | 2.72 | 1.34 | 0.76 | 0.77 | 0    | 0.56 | 0.3  | 0.14 | 0.19 |
| TA02-E2 | 62.29 | 24.9  | 3.37 | 2.58 | 3.26 | 1.4  | 0.74 | 0.91 | 0    | 0.56 | 0    | 0    | 0    |
| TA02-E3 | 60.8  | 27.15 | 3.05 | 2.41 | 2.71 | 1.45 | 0.74 | 0.8  | 0    | 0.57 | 0.33 | 0    | 0    |

Se puede observar una composición mineralógica similar en relación a los 5 tipos de suelo en la cual predomina el hierro siempre entre 60 y 69% siguiéndole el silicio entre el 20-27% de la composición total. Cabe mencionar que se obtuvo 0% en fósforo, magnesio y



aluminio. Comparando el TA01 y el TA02 se puede observar que el TA01 es de 3 a 8% más abundante en su composición de Fe de igual manera menos abundante en comparación al Si.

### 5.3 Cloruro en suelo

El ion cloruro es uno de los iones inorgánicos que se encuentran en mayor cantidad en aguas naturales y su presencia es necesaria en aguas potables. En agua potable el sabor salado producido por la concentración de cloruros es variable. Este ion puede estar ausente cuando los cationes que predominan son calcio y magnesio. Un alto contenido de cloruros puede deteriorar el suelo (NMX-AA-073-SCFI-2001, 2001).

**Tabla 3:** Resultado de análisis de Cloruros totales de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo

| Muestra | Cloruros (mg/L) |
|---------|-----------------|
| TA01-E1 | 8.86            |
| TA01-E2 | 10.64           |
| TA02-E1 | 8.42            |
| TA02-E2 | 9.31            |
| TA02-E3 | 9.31            |

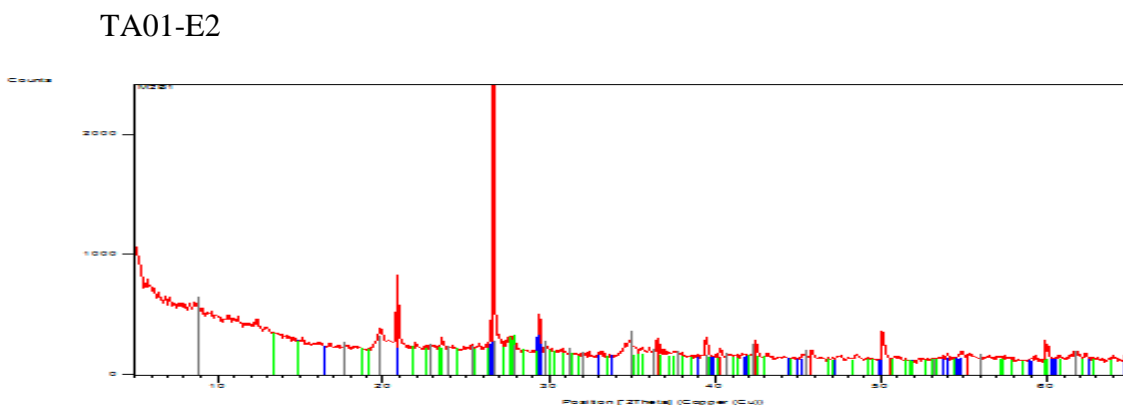
Se obtuvo la concentración más alta de cloruros totales en la muestra TA01-E2 con 10.64 mg/L. Siguiéndole las muestras TA02-E2 y TA02-E3 de la balsa número 2 ambas con 9.31 mg/L. Se puede observar que los estratos superiores son los que obtuvieron las concentraciones más bajas de cloruros; se le puede atribuir esto a la presencia de cloritas en la zona o a la propiedad de lixiviación de los cloruros.

## 5.4 Difracción de rayos X (XRD)

La difracción de rayos X (XRD) es una técnica analítica versátil, no destructiva para la identificación y determinación cuantitativa de las diferentes formas cristalinas conocidas como “*fases*” de los compuestos presentes en las muestras de polvo. La identificación se consigue comparando el patrón de difracción de rayos X o difractograma, de una base de datos que contiene patrones de referencia para las fases presentes (posiciones, áreas y fondo de los picos) (American Assay, 2016).

Para el análisis se empleó el modelo D8 Advance de Bruker y 10gr de muestra representativa de suelo, con el fin de obtener la composición mineralógica que conforma dichos horizontes.

Las pruebas de difracción de rayos X (XRD) fueron realizados en el laboratorio de rayos X en el Centro de Investigación de Materiales Avanzados (CIMAV) de la Ciudad de Chihuahua. Como se mencionó anteriormente la muestra TA01-E1, al tener una profundidad no mayor a 0.10m, se optó por omitir su análisis, a continuación se muestran los resultados obtenidos en el análisis.



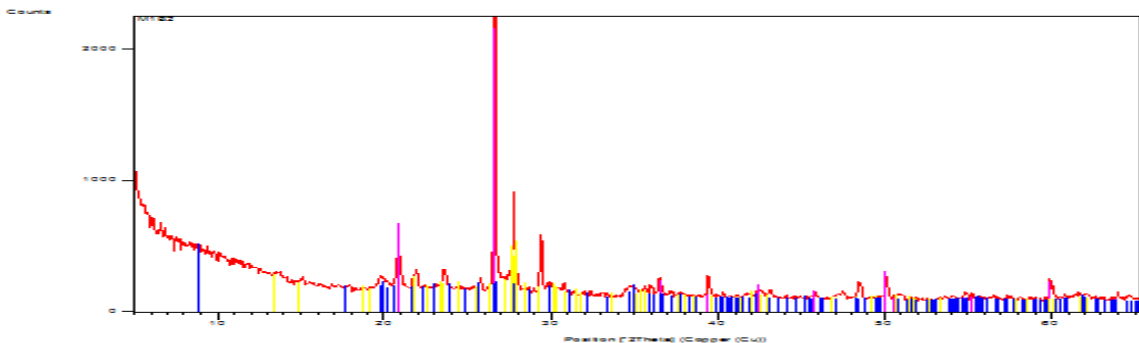
**Figura 7:** Difractograma de la muestra TA01-E2 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

**Tabla 4:** Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA01-E2

| Código de referencia | Nombre del compuesto | Fórmula química  | Color de pico | Abundancia    |
|----------------------|----------------------|--|---------------|---------------|
| 01-089-1961          | Cuarzo               | SiO <sub>2</sub>   | rojos         | muy abundante |
| 01-075-1381          | Coesita              | SiO <sub>2</sub>   | azules        | poco          |
| 00-041-1486          | Anortita             | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>                 | verdes        | poco          |
| 00-001-1098          | Muscovita (Sericita) | H <sub>2</sub> KAl <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> | grises        | poco          |

La muestra TA01-E2 corresponde a un suelo representativo de tipo regosol de la clasificación de INEGI (2003) y predomina la textura arenosa y su color rojizo. Como se observa en el resultado de difracción de rayos X (XRD), el Sílice (SiO<sub>2</sub>) es el compuesto más abundante en la muestra y componente principal de los limos y arenas que concuerdan con la textura del suelo. Se puede apreciar poca abundancia en anortita que es un aluminosilicato de calcio y de igual manera se encontró poca abundancia en moscovita (de micas de potasio).

TA02-E1



**Figura 8:** Difractograma de la muestra TA02-E1 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

**Tabla 5:** Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA02-E1

| Código de referencia | Nombre del compuesto | Fórmula química   | Color de pico | Abundancia    |
|----------------------|----------------------|---|---------------|---------------|
| 01-089-1961          | Cuarzo               | SiO <sub>2</sub>  | magenta       | muy abundante |
| 00-041-1486          | Anortita             | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub>                  | amarillos     | poco          |
| 01-074-2428          | Muscovita (Sericita) | KAl <sub>3</sub> Si <sub>3</sub> O <sub>1</sub> (OH) <sub>2</sub> | azules        | muy poco      |



TA02-E2

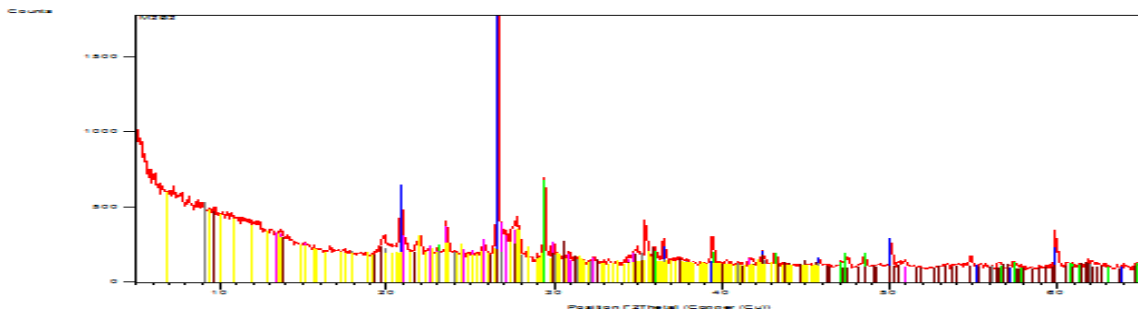


Figura 9: Difractograma de la muestra TA02-E2 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

Tabla 6: Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA02-E2

| Código de referencia | Nombre del compuesto      | Fórmula química  | Color de pico | Abundancia     |
|----------------------|---------------------------|--|---------------|----------------|
| 01-089-1961          | Cuarzo                    | SiO <sub>2</sub>   | azules        | muy abundante  |
| 00-010-0353          | Sanidina                  | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | magentas      | abundante      |
| 01-086-2339          | Calcita                   | Ca(CO <sub>3</sub> )   | verdes        | poco           |
| 00-001-1098          | Muscovita (Sericita)      | H <sub>2</sub> KAl <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                           | grises        | indicios       |
| 01-076-6770          | Orthoestantita (piroxeno) | Mg(SiO <sub>3</sub> )  | marrones      | bajos indicios |
| 01-076-0833          | Bytownita                 | Ca <sub>0.86</sub> Na <sub>0.14</sub> Al <sub>1.94</sub> Si <sub>2.06</sub> O <sub>8</sub> | amarillos     | bajos indicios |

TA02-E3

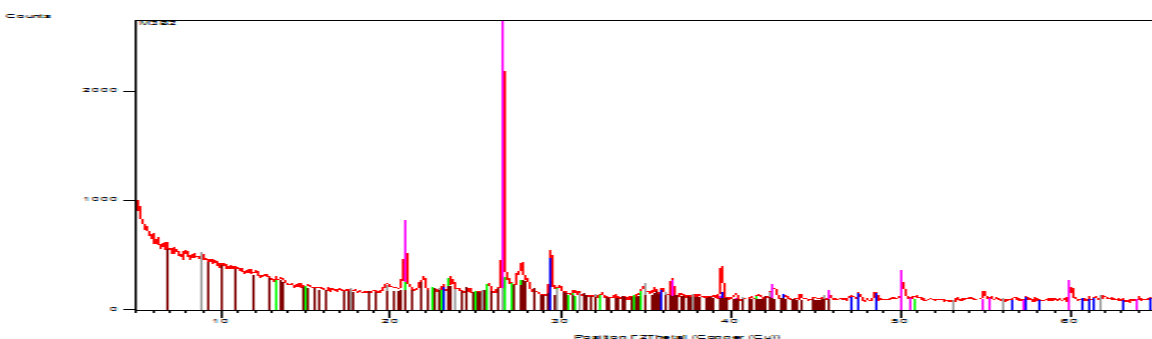


Figura 10: Difractograma de la muestra TA02-E3 de la zona de estudio en el Acuífero Tabalaopa-Aldama.

Tabla 7: Resultado de análisis de difracción de rayos X (XRD) de la muestra TA02-E3

| Código de referencia | Nombre del | Fórmula química | Color de pico | Abundancia |
|----------------------|------------|-----------------|---------------|------------|
|----------------------|------------|-----------------|---------------|------------|



| compuesto   |           |  |          |                |
|-------------|-----------|--|----------|----------------|
| 01-089-1961 | Cuarzo    | SiO <sub>2</sub>   | magenta  | muy abundantes |
| 01-081-2027 | Calcita   | Ca(CO <sub>3</sub> )   | azules   | abundante      |
| 00-010-0353 | Sanidina  | KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>  | verdes   | poco           |
| 00-001-1098 | Muscovita | H <sub>2</sub> KAl <sub>3</sub> (SiO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>                           | grises   | indicios       |
| 01-076-0833 | Bytownita | Ca <sub>0.86</sub> Na <sub>0.14</sub> Al <sub>1.94</sub> Si <sub>2.06</sub> O <sub>8</sub> | marrones | indicios       |

En el TA02 se puede apreciar que el cuarzo se mantiene muy abundante en las 3 muestras (TA02, E1, E2 y E3). Comparando la muestra E2 y la E3 se observa que del estrato superior al inferior la sanidina, de ser abundante disminuye a poco abundante, mientras de forma contraria aumenta la calcita de poco abundante a abundante en el estrato inferior, mejorando la calidad de suelo para la infiltración, suponiendo que la sanidina pudiera aportar aluminio al lixiviado.

## 5.5 Hidrogeoquímica

En las tablas 8 y 9 se muestra un resumen de los resultados del análisis de los lixiviados adquiridos en el experimento de columnas de suelo de cada uno de los 5 estratos obtenidos en el muestreo mencionado en el apartado 5.1 Caracterización de material.

Tanto el experimento de columnas como los análisis descritos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Sanitaria de la Facultad de Ingeniería (UACH) y se compararon los resultados con los límites máximos permisibles que indica la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 “*Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*”.

**Tabla 8:** Resultados de análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo (TA01 es el punto de muestreo, E1 corresponde al estrato 1) (se encuentran marcados de color rojo y subrayados los parámetros que se encuentran por encima del límite permisible que menciona la norma NOM-127-SSA1-1994)

| Muestra | C.E<br>μS/cm | pH          | HCO <sub>3</sub> | F<br>mg/L   | N-NO <sub>3</sub><br>mg/L | NO <sub>3</sub><br>mg/L | CO <sub>3</sub><br>mg/L | SO <sub>4</sub><br>mg/L |
|---------|--------------|-------------|------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| TA01-E1 | 1881         | 7.93        | 717.36           | 0.42        | <u>128</u>                | 567.04                  | 0                       | 127.57                  |
| TA01-E2 | 6410         | 7.66        | 146.89           | 1.23        | <u>553</u>                | 2449.79                 | 0                       | <u>1518.56</u>          |
| TA02-E1 | 405          | <u>8.78</u> | 239.12           | 0.49        | 6.53                      | 28.91                   | 28.6                    | 2.01                    |
| TA02-E2 | 361          | 8.49        | 215.21           | <u>1.62</u> | 7.03                      | 31.15                   | 13                      | 3.07                    |
| TA02-E3 | 306          | 8.26        | 249.37           | 1.31        | 7.28                      | 32.23                   | 0                       | 2.49                    |
| Blanco  | 6.8          | <u>6.3</u>  | 10.25            | 0           | 2.1                       | 9.31                    | 0                       | 0.81                    |

**Tabla 9:** Resultados de análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo

| Muestra | Alcalinidad<br>mg de<br>CaCO <sub>3</sub> /L | Cl<br>mg/L | Na<br>mg/L | Ca<br>mg/L | Mg<br>mg/L | K<br>mg/L | As<br>mg/L |
|---------|--|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
| TA01-E1 | 588  | 11.15      | 13.78      | 79.27      | 212.59     | 13.25     | 0.0045     |
| TA01-E2 | 120.4  | 212.91     | 128.5      | 1270       | 224        | 19.78     | 0          |
| TA02-E1 | 196  | 3.55       | 0          | 82.96      | 2.07       | 2.4       | 0.006      |
| TA02-E2 | 176.4  | 9.63       | 0          | 83.78      | 1.71       | 1.93      | 0.002      |
| TA02-E3 | 204.4  | 3.04       | 0          | 70.61      | 2.39       | 3.5       | 0.008      |
| Blanco  | 8.4  | 0.51       | 2.27       | 0.79       | 1.48       | 1.82      | 0.0015     |

Dentro de los resultados arrojados en el análisis físicoquímico se puede observar un ligero aumento en la alcalinidad en la muestra TA01-E1, Este aumento se puede atribuir al tipo de clima predominante en la zona de estudio (seco semicálido) que coincide en temperaturas altas y precipitaciones en verano, lo que pudiera indicar una evaporación excesiva y por ende una acumulación de minerales en los primeros perfiles de suelo.

Comparando los dos puntos de muestreo, también se observa que el pH tiende a disminuir del estrato superior al inferior. Puede notarse que el pH oscila entre 7.66 a 8.78 donde se obtendría una buena disponibilidad de minerales al lixiviado según la figura 11.

Asimismo, se observa que la muestra TA02-E2 arrojó 1.62 mg/L de flúor, apenas 0.12 mg/L por encima de la Norma Oficial Mexicana que indica 1.5mg/L de flúor como límite permisible. Cabe mencionar que este perfil no tiene más de 20cm y se aprecia una disminución de 0.31mg/L de flúor para el siguiente estrato (TA02-E3). También es importante señalar que se interpolaron los datos gráficos de hidrogeoquímica del acuífero



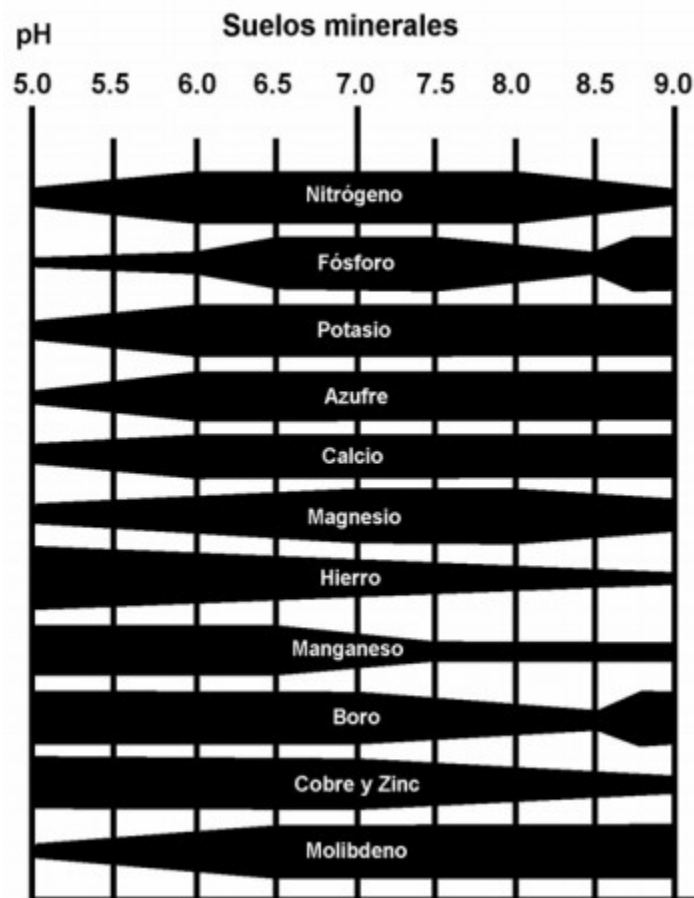
aportados por el estudio “*Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria*” de CONAGUA y UACH (2012) para obtener una aproximación de la calidad del agua subterránea.

Estos datos indican para la zona de las balsas una concentración de 2.5mg/L de flúor en el agua del acuífero por lo que suponiendo el peor escenario, que la concentración de flúor al momento de recargar sea de 1.62mg/L, ésta tendría a mejorar la calidad de agua subterránea al momento de llevarse a cabo la recarga artificial.

Para el TA01 (punto de muestreo 1) se observa que las 2 muestras presentan una elevada concentración de nitratos como nitrógeno, una de ellas hasta 50 veces más de lo que indica la Norma Mexicana de agua potable; sin embargo, cabe señalar que ambas muestras de suelo se tomaron muy superficialmente (no más de 30cm) donde la actividad biológica es elevada al igual que la densidad vegetativa y proporcionalmente a éstas se ve reflejada una alta concentración de nitrógeno.

Con respecto a los altos niveles de sulfato, sobre todo en la muestra TA01-E2, se le pueden atribuir a la presencia de anhidrita, al tipo de clima seco semicálido con procesos de evaporación rápida, o a la actividad agrícola en la zona.

El blanco consistió en verter agua destilada que se utilizó para el experimento de columnas en una columna sin suelo, con el fin de evaluar la calidad de agua que pudiera aportar únicamente la columna.



**Figura 11:** Disponibilidad relativa de elementos conforme el pH (mientras más gruesa sea la barra del elemento más disponibilidad de minerales) (Kuhns, 1985).

### 5.6 Balance iónico

Posteriormente a los resultados del análisis de laboratorio se procedió a aplicar el método de balance iónico que nos permite conocer la calidad de los análisis realizados, arrojando como resultado un porcentaje de error en los mismos. El balance iónico está basado en que la sumas de los aniones y cationes expresados en miliequivalentes por litro deben de estar en equilibrio por que las aguas potables son eléctricamente neutras (SMWW\_1000-3000, 1999). El método se basa en la diferencia porcentual definida en la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de error} = 100 \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}}$$



Donde el criterio de aceptación de los análisis es el siguiente:

**Tabla 10:** Criterios de aceptación de análisis físico-químico de agua por SMWW\_1000-3000

| $\Sigma$<br>Aniones | Diferencia<br>aceptable |
|---------------------|-------------------------|
| 0 - 3               | $\pm 0.2$ meq/L         |
| 3 - 10              | $\pm 2\%$               |
| 10 - 800            | 5%                      |

**Tabla 11:** Resultado, sumatorias y porcentajes de cationes obtenidos en el análisis físico-químico del experimento de columnas de suelo

| Muestra | Na<br>meq/L | K<br>meq/L | Ca<br>meq/L | Mg<br>meq/L | Total<br>meq/L | % Na | % K   | % Ca  | % Mg  |
|---------|-------------|------------|-------------|-------------|----------------|------|-------|-------|-------|
| TA01-E1 | 0.6         | 0.34       | 3.96        | 17.5        | 22.4           | 2.69 | 1.51  | 17.69 | 78.11 |
| TA01-E2 | 5.61        | 0.51       | 63.5        | 18.44       | 88.05          | 6.37 | 0.57  | 72.12 | 20.94 |
| TA02-E1 | 0           | 0.06       | 4.15        | 0.17        | 4.38           | 0    | 1.4   | 94.71 | 3.89  |
| TA02-E2 | 0           | 0.05       | 4.19        | 0.14        | 4.38           | 0    | 1.12  | 95.66 | 3.21  |
| TA02-E3 | 0           | 0.09       | 3.53        | 0.2         | 3.82           | 0    | 2.34  | 92.5  | 5.15  |
| Blanco  | 0.1         | 0.05       | 0.04        | 0.12        | 0.31           | 32.3 | 15.14 | 12.87 | 39.69 |

**Tabla 12:** Resultado, sumatorias y porcentajes de aniones obtenidos en el análisis físico-químico del experimento de columnas de suelo

| Muestra | HCO <sub>3</sub><br>meq/L | Cl<br>meq/L | NO <sub>3</sub><br>meq/L | SO <sub>4</sub><br>meq/L | TOTAL<br>meq/L | % HCO <sub>3</sub> | % Cl | % NO <sub>3</sub> | % SO <sub>4</sub> |
|---------|---------------------------|-------------|--------------------------|--------------------------|----------------|--------------------|------|-------------------|-------------------|
| TA01-E1 | 11.76                     | 0.31        | 9.15                     | 2.66                     | 23.88          | 49.25              | 1.32 | 38.3              | 11.13             |
| TA01-E2 | 2.41                      | 6.01        | 39.51                    | 31.64                    | 79.57          | 3.03               | 7.56 | 49.66             | 39.76             |
| TA02-E1 | 3.92                      | 0.1         | 0.47                     | 0.04                     | 4.53           | 86.56              | 2.21 | 10.3              | 0.93              |
| TA02-E2 | 3.53                      | 0.27        | 0.5                      | 0.06                     | 4.37           | 80.8               | 6.23 | 11.51             | 1.46              |
| TA02-E3 | 4.09                      | 0.09        | 0.52                     | 0.05                     | 4.75           | 86.14              | 1.81 | 10.95             | 1.09              |
| Blanco  | 0.17                      | 0.01        | 0.15                     | 0.02                     | 0.35           | 48.10              | 4.10 | 42.97             | 4.83              |

**Tabla 13:** Resultado del método de balance iónico o porcentaje de error del análisis físico-químico del experimento de columnas de suelo

| Muestra | % de Error |
|---------|------------|
| TA01-E1 | -3.19      |
| TA01-E2 | 5.06       |
| TA02-E1 | -1.67      |
| TA02-E2 | 0.14       |
| TA02-E3 | -10.85     |
| Blanco  | -6.47      |



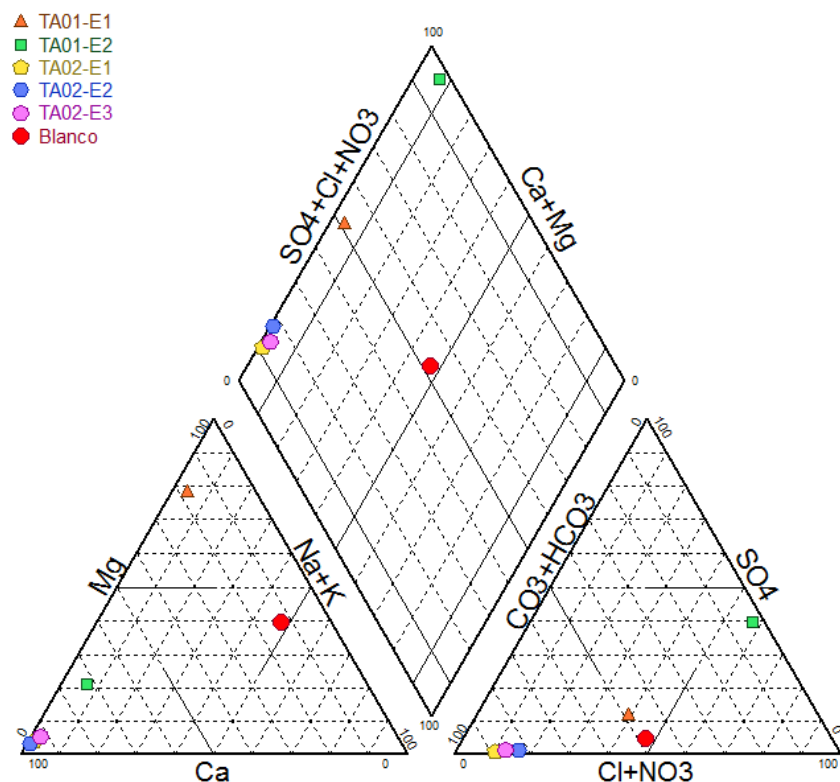
Para el TA01-E2 se tiene una muestra no aceptable con apenas 0.06%; cabe resaltar que debido a la alta concentración de minerales en esta muestra se tuvieron que hacer diluciones en varios análisis por lo que se modificaron los métodos convencionales utilizados en el laboratorio, las muestras TA02-E3 tuvo un elevado porcentaje de error superando por 8% el límite aceptable por el SMWW.

### 5.7 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper incluye en forma paralela cationes y aniones. En él se pueden representar múltiples análisis en forma de comparación donde aguas geoquímicamente semejantes se ubican en un área específica.

Consta de dos triángulos equiláteros, en donde se representan los cationes y aniones predominantes. Los cationes utilizados son  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$  y  $\text{Na}^{+}+\text{K}^{+}$ , mientras que en los aniones  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{CO}_3^{-2}$  y  $\text{HCO}_3^{-}$  y por último  $\text{Cl}^{-}$  y  $\text{NO}_3^{-}$ . Los valores de estos dos triángulos se representan en un rombo central que es el que determina el tipo de familia de agua a la que pertenecen las muestras de agua (Agua y SIG, 2011).

En el diagrama de Piper que se muestra en la figura 12 se pueden observar 3 tipos de agua diferentes donde los estratos de las muestras TA01 tienden de la muestra TA01-E1 con un agua bicarbonatada magnésica a la muestra TA01-E2 a un agua híper sulfatada cálcica, habiendo un cambio significativo en el tipo de familia de agua de un estrato a otro, mientras que en el punto de muestreo 2 a pesar de ser 3 estratos los 3 conservaron un patrón referente a la familia de agua bicarbonatada cálcica, en tanto al blanco tiene a ser un agua pura.

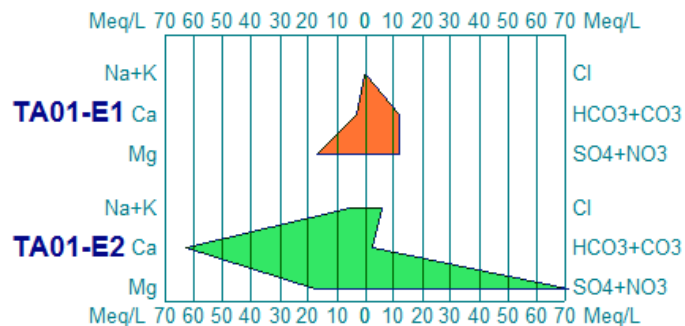


**Figura 12:** Diagrama de Piper de las muestras de lixiviado del experimento de columnas de suelo de los estratos obtenidos en el área de estudio del Acuífero Tabalaopa-Aldama.

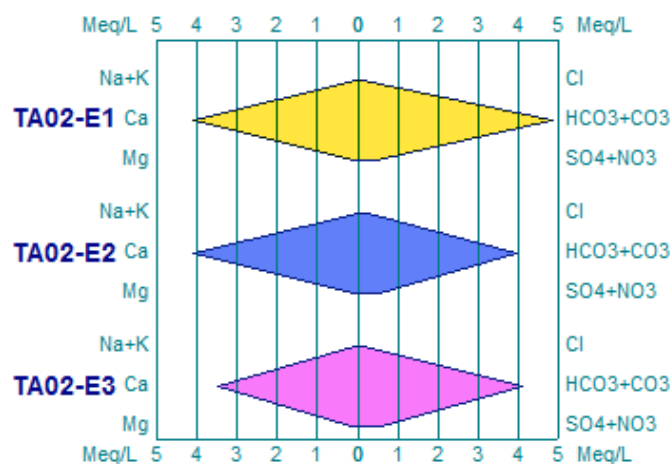
### 5.8 Diagrama de Stiff

El diagrama de Stiff permite identificar gráficamente el tipo de agua y por otra parte se puede observar el grano de mineralización de cada catión o anión. Consta de una gráfica compuesta por 3 ejes horizontales, cada uno de estos ejes conteniendo un catión y un anión. Los cationes se disponen del lado izquierdo del diagrama, mientras que los aniones se localizan en su lado derecho, el Na+K se confrontan con el Cl, el Ca con el HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub> y el Mg con el SO<sub>4</sub>+NO<sub>3</sub>, todos los ejes horizontales se encuentran a la misma escala y las concentraciones están dadas en meq/L anteriormente obtenidas para el balance iónico o porcentaje de error (Agua y SIG, 2011).

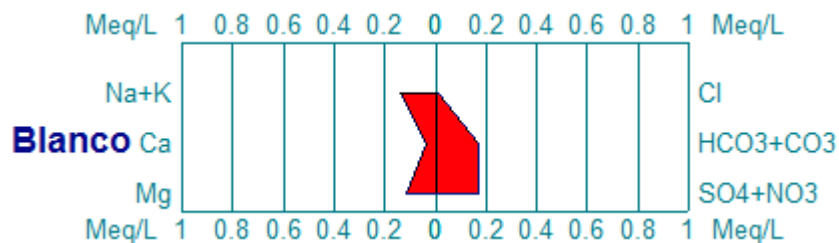




**Figura 13:** Diagramas de Stiff de las muestras de lixiviado del experimento de columnas de suelo de los estratos obtenidos en el punto de muestreo 1 en el área de estudio del Acuífero Tabalaopa-Aldama.



**Figura 14:** Diagramas de Stiff de las muestras de lixiviado del experimento de columnas de suelo de los estratos obtenidos en el punto de muestreo 2 en el área de estudio del Acuífero Tabalaopa-Aldama.



**Figura 15:** Diagrama de Stiff del blanco del experimento de columnas de suelo.

En el TA01 se puede apreciar en la figura 13 del diagrama de Stiff el E1 tiene a una familia de agua bicarbonatada magnésica mientras que el E2 es claramente de una familia de agua sulfatada cálcica con alto contenido de nitratos. Cabe recordar, como se mencionó anteriormente la muestra fue tomada a no más de 30cm en una zona con alta densidad



vegetativa sujeta a un proceso de evaporación intensa, lo que supondría un aumento significativo en la concentración total de meq/L. En el TA02 se puede observar en la figura 14 el tipo de familia predominante a los lixiviados de los estratos E1, E2 y E3 a los cuales les pertenece un agua Bicarbonatada Cálctica y se puede observar como el lixiviado tiene a mejorar su calidad de acuerdo a la profundidad del estrato.

### **5.9 Seguimiento del experimento de columnas de suelo**

En las tablas 14 y 15 se muestra un resumen de los resultados del análisis de los lixiviados adquiridos en el seguimiento del experimento de columnas de suelo de cada uno de los 5 estratos mencionados anteriormente en el apartado de 5.5 hidrogeoquímica. Se compararon los resultados con los límites máximos permisibles que indica la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994.

En la tabla 16 se muestra una comparación del agua a recargar en cloruros, nitratos, sulfatos, flúor y arsénico a la calidad del agua subterránea para determinar así una posible afectación al acuífero (datos del acuífero obtenidos del Estudio de hidrogeoquímica-UACH, 2015).

Cabe mencionar que para las muestras TA01-E1 y TA02-E3 debido a la baja permeabilidad o buena compactación del material, sólo se pudo recuperar un lixiviado suficiente para realizar un análisis completo. También se indica que tras la recolección de muestra del lixiviado de la columna al recipiente de almacenamiento de las muestras TA02-E1 y TA02-E2 se observó que tras transcurrir un tiempo se notaba una pequeña capa de coloides sedimentados en el fondo del recipiente, lo que pudo agregar un tiempo de residencia de materiales finos no deseados al lixiviado y alterar así su composición principalmente en los elementos que se encuentran en cantidades traza.



**Tabla 14:** Resultados del seguimiento del análisis físicoquímico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo (A1 corresponde al análisis del lixiviado 1) (se encuentran marcados de color rojo y subrayados los parámetros que se encuentran por encima del límite permisible que menciona la norma NOM-127-SSA1-1994)

| Muestra    | C.E<br>μS/cm | pH          | HCO <sub>3</sub> | F<br>mg/L   | N-NO <sub>3</sub><br>mg/L | NO <sub>3</sub><br>mg/L | CO <sub>3</sub><br>mg/L | SO <sub>4</sub><br>mg/L |
|------------|--------------|-------------|------------------|-------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| TA01-E1-A1 | 1881         | 7.93        | 717.36           | 0.42        | <u>128</u>                | 567.04                  | 0                       | 127.57                  |
| TA01-E2-A1 | 6410         | 7.66        | 146.89           | 1.23        | <u>553</u>                | 2449.79                 | 0                       | <u>1518.56</u>          |
| TA01-E2-A2 | 3580         | 8.47        | 160.55           | 0.99        | <u>61.75</u>              | 273.55                  | 15.6                    | <u>1575.09</u>          |
| TA01-E2-A3 | 1360         | <u>8.61</u> | 177.63           | 0.8         | <u>16.44</u>              | 72.81                   | 26                      | <u>685.99</u>           |
| TA01-E2-A4 | 507          | <u>8.79</u> | 184.46           | 0.53        | 3                         | 13.3                    | 10.4                    | 145.72                  |
| TA02-E1-A1 | 405          | <u>8.78</u> | 239.12           | 0.49        | 6.53                      | 28.91                   | 28.6                    | 2.01                    |
| TA02-E1-A2 | 334          | 8.17        | 304.02           | 0.44        | 3.64                      | 16.12                   | 0                       | 2.97                    |
| TA02-E1-A3 | 266          | <u>8.56</u> | 239.12           | 0.54        | 2.2                       | 9.76                    | 10.4                    | 1.72                    |
| TA02-E2-A1 | 361          | 8.49        | 215.21           | <u>1.62</u> | 7.03                      | 31.15                   | 13                      | 3.07                    |
| TA02-E2-A2 | 203          | <u>8.54</u> | 187.88           | <u>1.72</u> | 1.16                      | 5.12                    | 7.8                     | 0.62                    |
| TA02-E3-A1 | 306          | 8.26        | 249.37           | 1.31        | 7.28                      | 32.23                   | 0                       | 2.49                    |
| Blanco     | 6.8          | <u>6.3</u>  | 10.25            | 0           | 2.1                       | 9.31                    | 0                       | 0.81                    |

**Tabla 15:** Resultados del seguimiento del análisis físico-químico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo de los 5 estratos obtenidos de los 2 puntos de muestreo

| Muestra    | Alcalinidad<br>CaCO <sub>3</sub> /L | Cl     | Na    | Ca    | Mg     | K     | As     |
|------------|-------------------------------------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|
| TA01-E1-A1 | 588                                 | 11.15  | 13.78 | 79.27 | 212.59 | 13.25 | 0      |
| TA01-E2-A1 | 120.4                               | 212.91 | 128.5 | 1270  | 224    | 19.78 | 0      |
| TA01-E2-A2 | 131.6                               | 50.69  | 90.84 | 645.3 | 97.4   | 17.05 | 0      |
| TA01-E2-A3 | 145.6                               | 5.07   | 39.46 | 229.6 | 29.8   | 12.48 | 0      |
| TA01-E2-A4 | 151.2                               | 0.51   | 20.8  | 85.28 | 8.97   | 9.17  | 0      |
| TA02-E1-A1 | 196                                 | 3.55   | 0     | 82.96 | 2.07   | 2.4   | 0.006  |
| TA02-E1-A2 | 249.2                               | 0.51   | 0     | 78.28 | 2.45   | 5.32  | 0.0075 |
| TA02-E1-A3 | 196                                 | 0      | 0     | 73.3  | 1.56   | 2.17  | 0.009  |
| TA02-E2-A1 | 176.4                               | 9.63   | 0     | 83.78 | 1.71   | 1.93  | 0      |
| TA02-E2-A2 | 154                                 | 0      | 0     | 49.94 | 1.11   | 1.67  | 0.005  |
| TA02-E3-A1 | 204.4                               | 3.04   | 0     | 70.61 | 2.39   | 3.5   | 0.008  |
| Blanco     | 8.4                                 | 0.51   | 2.27  | 0.79  | 1.48   | 1.82  | 0      |

En el seguimiento del análisis físicoquímico se aprecia una notable reducción al aporte de minerales de cada estrato al lixiviado, esto se ve reflejado en la disminución de la conductividad eléctrica, en la muestra TA01-E2. En la tabla 14 se aprecia una reducción del flúor de 1.23 a 0.53 mg/L en sólo 4 lavados, así como una mejora considerable en los parámetros de nitratos y sulfatos que se encontraban por encima del límite máximo permisible por la norma Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) a un límite permisible en sólo 4 lavados al suelo. También es notable una disminución en cloruros, sodio, calcio, magnesio



y potasio. Para el TA02 se aprecia una disminución en nitratos, cloruros y calcio principalmente, se aprecia también que el flúor aumentó al igual que el arsénico, éste último muy por debajo del límite permisible. Se le puede atribuir esto a que en el momento de la recolección se colaron fragmentos de arcillas que sólo fueron visibles tras pasar un tiempo de residencia y ser asentados en el fondo de los contenedores. A continuación, se muestra en la tabla 16 como afectaría la infiltración a la calidad de agua del acuífero.

**Tabla 16:** Comparación de los resultados del seguimiento del análisis físicoquímico de los lixiviados del experimento de columnas de suelo con la calidad del agua subterránea de la zona de estudio y su tendencia a mejorar o bajar la calidad de cloruros, nitratos, sulfatos, flúor y arsénico y si ésta es permisible o no de acuerdo a la Norma Mexicana (NOM-127-SSA1-1994) (mejorar = M, bajar = B, Permisible = P, No permisible = NP)

| Muestra    | Acuífero<br>Cl<br>17 mg/L<br>Tendencia | Acuífero<br>N-NO3<br>1 mg/L<br>Tendencia | Acuífero<br>SO4<br>100 mg/L<br>Tendencia | Acuífero<br>F<br>2.5 mg/L<br>Tendencia | Acuífero<br>As<br>0.03 mg/L<br>Tendencia |
|------------|--|--|--|--|--|
| TA01-E1-A1 | M-P                                    | B-NP                                     | B-P                                      | M-P                                    | M-P                                      |
| TA01-E2-A1 | B-P                                    | B-NP                                     | B-NP                                     | M-P                                    | M-P                                      |
| TA01-E2-A2 | B-P                                    | B-NP                                     | B-NP                                     | M-P                                    | M-P                                      |
| TA01-E2-A3 | M-P                                    | B-NP                                     | B-NP                                     | M-P                                    | M-P                                      |
| TA01-E2-A4 | M-P                                    | B-P                                      | B-P                                      | M-P                                    | M-P                                      |
| TA02-E1-A1 | M-P                                    | B-P                                      | M-P                                      | M-P                                    | M-P                                      |
| TA02-E1-A2 | M-P                                    | B-P                                      | M-P                                      | M-P                                    | M-P                                      |
| TA02-E1-A3 | M-P                                    | B-P                                      | M-P                                      | M-P                                    | M-P                                      |
| TA02-E2-A1 | M-P                                    | B-P                                      | M-P                                      | M-NP                                   | M-P                                      |
| TA02-E2-A2 | M-P                                    | B-P                                      | M-P                                      | M-NP                                   | M-P                                      |
| TA02-E3-A1 | M-P                                    | B-P                                      | M-P                                      | M-P                                    | M-P                                      |

Se puede apreciar en la tabla 16 cómo la calidad de agua del acuífero podría bajar en cuanto a los nitratos y sulfatos en un periodo inicial a un valor no permisible, pero después de varios eventos de infiltración se observa cómo la calidad tiende a mejorar considerablemente sin afectar negativamente el agua del acuífero. Se observa una mejoría muy considerable en cuanto al flúor y arsénico pudiendo, mediante el método de recarga artificial, mejorar la calidad del agua subterránea y así subir la calidad de vida de la población circundante a la zona de estudio.



## 6. Conclusiones y Recomendaciones

Se puede concluir que en los puntos TA01 y TA02 la proporción de arcillas disminuye mientras que las gravas y arenas aumentan conforme la profundidad de los perfiles. Con respecto a los cloruros en suelos mostrados en la Tabla 3, estos tendían a aumentar con la profundidad, lo anterior se atribuye a que los cloruros son solubles en agua y tienden a ser lixiviados a los perfiles más bajos, mientras en los perfiles más someros predomina un pH superior que a los perfiles inferiores; se atribuye esta observación al tipo de clima seco semicálido de la zona de estudio. En cuanto a la fluorescencia de rayos X (XRF) se obtuvieron Fe y Si como elementos predominantes, además se obtuvo 0% de Mg y Al, donde el análisis de Difracción de rayos X (XRD) detectó para la muestra TA01-E2 poca abundancia en anortita, un feldespato con contenido de Al ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ); de igual forma para la muestra TA02-E2 se muestra abundante en sanidina, la cual es fuente de K y Al ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ).

Dichos resultados permiten suponer que, al no ser muy abundantes la anortita y la sanidina y al realizarse la prueba con granos gruesos de muestra, este material de grano grueso dificultó el análisis de estos 2 minerales previamente mencionados. En cuanto al Mg la fluorescencia de rayos X (XRF) detectó 0% en la totalidad de las muestras, mientras que en la difracción de rayos X (XRD) para la muestra TA02-E2 se detectó Orthoestantita (piroxeno,  $\text{Mg}(\text{SiO}_3)$ ) el cual puede ser la fuente de Mg aportado a los lixiviados, aunque este mineral se encuentra en poca abundancia, todas las muestras en el análisis hidrogequímico mostraron su existencia.

Se recomienda estudiar mediante fluorescencia de rayos X (XRF) y difracción de rayos X (XRD) la composición mineralógica de las arcillas existentes en la zona de estudio, también realizar el experimento de columnas de suelo a los perfiles más representativos de las balsas, así como aumentar la frecuencia del monitoreo de calidad de agua del acuífero, en los pozos de la CNA que se encuentran alrededor de la zona de estudio, esto con el fin de colaborar a mejorar la calidad del agua subterránea.



## 7. Referencias

- Agua y SIG. (10 de Octubre de 2011). Obtenido de <http://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>
- American Assay. (24 de 10 de 2016). Obtenido de <http://www.aallabs.com/technology/xrd>
- Armendáriz Hernández, A. L., & Pinales Munguía, A. (2016). *Diseño de columnas de suelo para experimentos de lixiviación en materiales del acuífero Tabalaopa-Aldama, Chihuahua, Chih.; México*. UACH.
- Auge, M. (2006). *Agua Subterránea Deterioro de Calidad y Reserva*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la Disponibilidad Media Anual de Agua en el Acuífero Tabalaopa-Aldama (0835), Estado de Chihuahua*. Chihuahua: Diario Oficial de la Federación.
- CONAGUA-UACH. (2012). *Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria*. Chihuahua.
- Dentz, M., Cortis, A., Scher, H., & Berkowitz, B. (2003). Time Behavior of Solute Transport in Heterogeneous Media: Transition From Anomalous to Normal Transport. *ELSEVIER*, 156-167.
- Dieleman, P. J., Boumans, J. H., Hulsbos, W. C., Lindenbergh, H. L., & Van Der Sluis, P. M. (1977). *Reclamation of Salt Affected Soils in Iraq*. Netherlands: International Institute for Land reclamation and improvement.
- Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. New York, USA: John Wiley and Sons.
- Dontsova, K. M., Yost, S. L., Simunek, J., Pennington, J. C., & Williford, C. W. (2006). Dissolution and Transport of TNT, RDX, and Composition B in Saturated Soil Columns. *Journal of Environmental Quality*, 2043-2052.
- Edmunds August, W. M. (2004). *Química del Agua Subterránea en la Zona no Saturada*. United Kingdom: Hydrogeology Journal.
- Hernández Araujo, J. A., Gascó Guerrero, G., Mármol, L., Bárcenas, J., & Polo, V. (2013). Biorrecuperación de Suelos Salinos con el Uso de Materiales Orgánicos.II. Lavado de Sales. *Facultad de Agronomía, Universidad del Zulia*, 485-499.
- INEGI. (2003). *Síntesis de Información Geográfica del Estado de Chihuahua*. México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Khosla, B. K., Gupta, R. K., & Abrol, I. P. (1979). *Salt Leaching and the Effect of Gypsum Application in a Saline-Sodic Soil*. Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Kuhns. (1985). *Fertilizing woody ornamentals*. Pennsylvania: College of agriculture.
- Mata Fernández, I., Rodríguez Gamiño, M. L., López Blanco, J., & Vela Correa, G. (2014). Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista digital del Departamento el Hombre y su Ambiente E-BIOS*, 34-40.
- Mezquitic Velázquez, M. Á., & Pinales Munguía, A. (2016). *Construcción de un modelo físico para simular la recarga artificial de la porción noroeste del acuífero Tabalaopa – Aldama, Chihuahua, México*. México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- M-MMP-1-02/03. (2003). *Método de muestreos y prueba de materiales, Secretaría de Comunicaciones y Transportes*.



- M-MMP-1-07/07. (2007). *Métodos de muestreo y prueba de materiales, Secretaría de Comunicaciones y Transportes.*
- NMX-AA-008-SCFI-2011. (2011). *Análisis de agua-determinación del pH-método de prueba, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NMX-AA-036-SCFI-2001. (2001). *Análisis de agua-determinación de acidez y alcalinidad en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NMX-AA-051-SCFI-2001. (2001). *Análisis de agua-determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-método de prueba, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NMX-AA-073-SCFI-2001. (2001). *Análisis de agua-determinación de cloruros totales en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NMX-AA-074-SCFI-2014. (2014). *Análisis de agua-medición del ion sulfato en aguas naturales, residuales y residuales tratadas-método de prueba, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NMX-AA-077-SCFI-2001. (2001). *Análisis de aguas-determinación de fluoruros en aguas naturales, residuales y residuales tratadas, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NMX-AA-079-SCFI-2001. (2001). *Análisis de aguas-determinación de nitratos en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas-método de prueba, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NMX-AA-093-SCFI-2000. (2000). *Análisis de agua-determinación de la conductividad electrolítica-método de prueba, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.*
- NOM-127-SSA1-1994. (2000). *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización, Secretaría de Salud y Asistencia.*
- Oxford. (2013). *X-MET 7000 Series, Handheld XRF analysers to suit your analysis requirements.* Oxford Instruments.
- Raisz, & Erwin. (1964). *Landforms of México: Cambridge, mass, edición privada.* mapa con texto, escala 1:3,000,000.
- Raymundo Raymundo, E., Nikolskii Gavrillov, I., Duwig, C., Prado Pano, B. L., Hidalgo Moreno, C. I., Gavi Reyes, F., & Figueroa Sandoval, B. (2008). Transporte de Atrazina en un Andosol y un Vertisol de México. *Interciencia*, 330-336.
- Reyes Gómez, V. M., Alarcón Herrera, M. T., Gutiérrez, M., & Núñez López, D. (2013). Fluoride and arsenic in an alluvial aquifer system in Chihuahua, México: Contaminant levels, potential sources, and co-ocurrence. *Springer Science.*
- Reyes Gómez, V. M., Alarcón Herrera, M. T., Núñez López, D., & Cruz Medina, R. (2010). Dinámica del arsénico en el Valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 21-31.
- Romero, F. M., Armienta, M. A., Gutiérrez, M. E., & Villaseñor, G. (2008). Factores Geológicos y Climáticos que Determinan la Peligrosidad y el Impacto Ambiental de Jales Mineros. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 52.
- Roscoe Moss. (1990). *Handbook of Ground Water Development.* California, USA: John Wiley and Sons.



- Samper, J., & Ayora, C. (1993). Acoplamiento de Modelos de Transporte de Solutos y de Modelos de Reacciones Químicas. *Estudios Geológicos*, 233-238.
- Sánchez Bernal, E. I., Ortega Escobar, H. M., Sandoval Orozco, G. T., Hernandez Viruel, R. A., & Estrada Vázquez, C. (2012). Lavado de Sales en Suelos Aluviales Costeros de Oaxaca, México, con Aguas Residuales Municipales Tratadas. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 344-358.
- SMWW\_1000-3000. (1999). *Standard methods for the examination of water and wastewater*,. United States of America, Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Sukia Irastortza, J., Willem Saaltink, M., & Carrera Ramírez, J. (2009). *Recarga de Acuíferos Mediante Agua de Lluvia*. España: Universitat Politècnica de Catalunya.
- Trujillo, R. D., & Pinales Munguía, A. (2015). *Caracterización hidrogeológica de la porción NW del acuífero Tabalaopa-Aldama para emplazar una obra de recarga artificial con agua de lluvia*. Universidad Autónoma de Chihuahua, Facultad de Ingeniería.
- Tuinhof, A., Foster, S., Kemper, K., Garduño, H., & Nanni, M. (2006). *Requerimientos de Monitoreo del Agua Subterránea*. Washington D.C., USA: Banco Mundial, GW MATE.
- USDA, Departamento de Agricultura, Servicio de Investigación Agrícola, Servicio de Conservación de Recursos Naturales, & Instituto de Calidad de Suelos. (1999). *Guía para la Evaluación de la Calidad y Salud del Suelo*. USA.
- Vega Gleason, S. (2002). *Riesgo Sanitario Ambiental por la Presencia de Arsénico y Fluoruros en los Acuíferos de México*. México D.F.: Comisión Nacional del Agua.
- Weber, J. B., & Peeper, T. F. (1982). Mobility and distribution of buthidazole and metabolites in four leached soils. *Weed Science*, 585-588.
- White, R. E., Heng, L. K., & Edis, R. B. (1998). *Physical Nonequilibrium in Soils: Modelling and Application*. Michigan, USA: H. Magdi Selim, Liwang Ma.