



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
DEPARTAMENTO DE GEOTECNIA E HIDRÁULICA**

TESIS

**ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO Y SU POTENCIAL
DE INFILTRACIÓN A TRAVÉS DE UNA DISCONTINUIDAD GEOLÓGICA
EN EL VALLE DE AGUASCALIENTES**

PRESENTA

Guillermo Eduardo Campos Moreno

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON
ESPECIALIDAD AMBIENTAL**

TUTOR

Dr. Martín Hernández Marín

CO-TUTOR

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez

COMITÉ TUTORIAL

M. José Luis López López

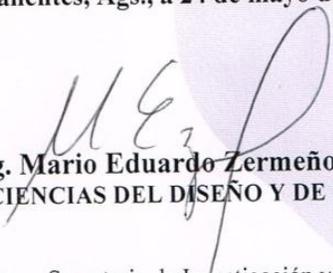
Aguascalientes, Ags. 24 de Mayo del 2016.

DRA. GUADALUPE RUIZ CUELLAR
DIRECCIÓN GENERAL DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
PRESENTE.

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: **“Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el Valle de Aguascalientes”**. Presentado por el sustentante: **ING. GUILLERMO EDUARDO CAMPOS MORENO** con ID **99953** egresado de la **MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**, cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

A T E N T A M E N T E
“SE LUMEN PROFERRE”
Aguascalientes, Ags., a 24 de mayo de 2016


Dr. en Ing. Mario Eduardo Zermeño de León
DECANO DEL C. DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

c.c.p.- M. en Ing. José Luis López López – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.
c.c.p.- Dr. Jesús Pacheco Martínez – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Dr. Martín Hernández Marín – Tutor de Tesis.
c.c.p.- Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez – Cotutor de Tesis.
c.c.p.- Ing. Guillermo Eduardo Campos Moreno – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.
c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.
c.c.p.- Archivo

MEZL/rbv



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE AGUASCALIENTES
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

DR. MARIO EDUARDO ZERMEÑO DE LEÓN
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **GUILLERMO EDUARDO CAMPOS MORENO** con ID **99953** quien realizó la tesis titulada: **ESTIMACIÓN DEL VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO Y SU POTENCIAL DE INFILTRACIÓN A TRAVÉS DE UNA DISCONTINUIDAD GEOLÓGICA EN EL VALLE DE AGUASCALIENTES**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que **él** pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

“Se Lumen Proferre”

Aguascalientes, Ags., a 22 de mayo de 2016.

Dr. Martín Hernández Marín
Tutor de tesis

Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez
Cotutor de tesis

M. en I. José Luis López López
Comité tutorial

V. B.

c.c.p.- Interesado
c.c.p.- Secretaría de Investigación y Posgrado
c.c.p.- Jefatura del Depto. de _____
c.c.p.- Consejero Académico
c.c.p.- Minuta Secretario Técnico

AGRADECIMIENTOS

Primeramente agradezco a Dios, que me permite cumplir otra meta y por darme la fortaleza necesaria para enfrentar las adversidades que se han presentado hasta este momento de mi vida.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Aguascalientes (UAA); por el apoyo recibido para el desarrollo de éste trabajo, dirigido por el Dr. Martín Hernández Marín a quien agradezco haberme aceptado como su tutorado, pero sobre todo por compartir sus conocimientos y estar al pendiente de los avances de éste trabajo; y así mismo, al Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez que actuando como co-tutor tuvo la paciencia para guiarme y revisar aspectos importantes del desarrollo de este trabajo.

A mis maestros y compañeros se agradece de manera especial, ya que cada uno de ellos, sin interés alguno, compartió sus conocimientos, permitiendo enriquecer los propios.

De igual manera agradezco infinitamente a mis padres, por todos sus buenos consejos, por su apoyo incondicional y esos ánimos que proyectaron hacia mi persona; los cuales me forjaron como la persona que soy hasta el momento. De la misma manera a cada una de mis lindas hermanas que tanto amo, que me han dado momentos de felicidad que no cambiaría por nada.

A ti Anita, por ser la maravillosa persona que me da la fortaleza de seguirme superando, te agradezco tu apoyo, tu paciencia y las motivaciones que me dabas para desarrollar de este trabajo.

A todos los familiares y amigos que han estado al pendiente de todos mis logros y metas personales, en especial a mi abuelo Julio Moreno, muchas gracias por ello.

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo de manera especial a mis sobrinos Suré y Mateo, y a mí ahijado Rubén, que son una de mis motivaciones para seguir contribuyendo en el cuidado de los recursos naturales y del medio ambiente.



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL 1

ÍNDICE TABLAS 4

ÍNDICE FIGURAS 6

RESUMEN 9

ABSTRACT 12

INTRODUCCIÓN 13

 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 13

 La escasez del recurso hídrico 13

 JUSTIFICACIÓN..... 22

 HIPÓTESIS 22

 OBJETIVO..... 22

 ANTECEDENTES..... 23

 Comportamiento de las fallas o fracturas ante el flujo de agua..... 23

 Aplicación de Métodos geofísicos para la identificación de zonas con saturación 24

 Proyecto de recarga artificial del sistema acuífero del valle de Aguascalientes.... 24

 Normativa aplicable a la recarga de acuíferos..... 25

CAPÍTULO I 28

1. MARCO TEÓRICO..... 28

 1.1. Hidrología superficial..... 28

 1.1.1. Geomorfología de la cuenca 28

 1.1.2. Volumen de escurrimiento superficial..... 28

 1.2. Discontinuidades geológicas 29

 1.1.1. Subsistencia 30

 1.3. Prospección geofísica 31

 1.3.1. Resistividad eléctrica 31

 1.3.2. Refracción sísmica..... 31

 1.4. Generalidades..... 32

CAPÍTULO II 39

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

| | |
|--|-----|
| 2. METODOLOGÍA | 39 |
| 2.1. Selección de la zona de estudio..... | 39 |
| 2.2. Hidrología superficial para estimación del volumen de escurrimiento..... | 39 |
| 2.2.1. Geomorfología de la cuenca | 39 |
| 2.2.2. Condiciones naturales de la cuenca..... | 44 |
| 2.2.3. Volumen de escurrimiento medio anual. | 46 |
| 2.3. Implementación de métodos geofísicos | 51 |
| 2.3.1. Selección del punto en la Falla Oriente dentro de la zona de estudio..... | 51 |
| 2.3.2. Sondeo eléctrico continuo (CVES)..... | 51 |
| 2.3.3. Método sísmico..... | 53 |
| CAPÍTULO III | 56 |
| 3. RESULTADOS..... | 56 |
| 3.1. Selección de la zona de estudio..... | 56 |
| 3.2. Hidrología superficial para estimación del volumen de escurrimiento..... | 59 |
| 3.2.1. Geomorfología de la cuenca | 59 |
| 3.2.2. Condiciones naturales de la cuenca..... | 65 |
| 3.2.3. Volumen de escurrimiento medio anual. | 75 |
| 3.3. Implementación de métodos geofísicos | 86 |
| 3.3.1. Selección del punto en la Falla Oriente dentro de la zona de estudio..... | 86 |
| 3.3.2. Sondeo eléctrico continuo (CVES) con arreglo Dipolo-Dipolo | 87 |
| 3.3.3. Método sísmico de refracción..... | 94 |
| CAPÍTULO IV..... | 98 |
| 4. DISCUSIONES | 98 |
| Perfiles de resistividad por el método de sondeo eléctrico continuo (CVES)..... | 98 |
| Relación de los perfiles obtenidos por los métodos geofísicos..... | 98 |
| Embalse regulador de escurrimientos superficiales | 100 |
| Consideraciones ambientales..... | 104 |
| CONCLUSIONES | 108 |
| GLOSARIO | 109 |
| REFERENCIAS CITADAS | 111 |
| APÉNDICES Y ANEXOS | 118 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

| | |
|--|-----|
| A-1. REGISTRO DE LLUVIAS MEDIAS MENSUALES EN LA ESTACIÓN AGUASCALIENTES II (1097) PROPORCIONADO POR CONAGUA..... | 119 |
| A-2. REGISTRO DE LLUVIAS MEDIAS MENSUALES EN LA ESTACIÓN CAÑADA HONDA (1004) PROPORCIONADO POR CONAGUA. | 120 |
| A-3. ARREGLO DIPOLO-DIPOLO BIDIMENSIONAL..... | 121 |
| A-4. MANUAL DE UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS DE QGIS-GRASS-SAGA PARA LA DELIMITACION DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA..... | 122 |



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

ÍNDICE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Distribución de las precipitaciones entre aguas superficiales y subterráneas (por regiones climáticas)..... | 14 |
| Tabla 2 Normativa a considerar para la recarga artificial. | 26 |
| Tabla 3 Niveles de desagregación de las Regiones Hidrológicas..... | 33 |
| Tabla 4. Clasificación convencional de las cuencas según su tamaño. | 40 |
| Tabla 5. Métodos utilizados para estimar datos faltantes. | 45 |
| Tabla 6. Parámetro k para Método del coeficiente de escurrimiento anual..... | 48 |
| Tabla 7. Clasificación de las CE según su tamaño..... | 60 |
| Tabla 8. Datos de la curva hipsométrica de la cuenca..... | 62 |
| Tabla 9. Elevación media de la CE..... | 63 |
| Tabla 10. Pendiente media de la CE | 64 |
| Tabla 11. Resumen red de drenaje de la CE..... | 64 |
| Tabla 12. Características geológicas de la CE y zonas aledañas..... | 67 |
| Tabla 13. Áreas de influencia de cada estación pluviométrica en la CE | 68 |
| Tabla 14. Consideraciones para Método Del Us National Weather Service, en la estación Aguascalientes II (1097)..... | 70 |
| Tabla 15. Datos faltantes para para el año de 1995 en la estación 1097 con Método del Us National Weather Service..... | 71 |
| Tabla 16. Datos faltantes para para el año de 2012 y 2013 de la estación 1097 con Método del Us National Weather Service | 71 |
| Tabla 17. Determinación de la precipitación media acumulada (verde) en la estación climatológica Aguascalientes II (1097) | 72 |
| Tabla 18. Datos faltantes de los años 1970 y 1972 de la estación Cañada Honda (1004) y sus consideraciones para el Método Racional Deductivo..... | 72 |
| Tabla 19. Dato faltante Enero del 2013 y consideraciones para Método Del Us National Weather Service, de la estación Cañada Honda (1004). | 73 |
| Tabla 20. Precipitación media de la CE por el Método de Polígonos de Thiessen..... | 73 |
| Tabla 21. Determinación de la precipitación media acumulada (verde) en la estación climatológica Cañada Honda (1004), a partir del resultado de los datos faltantes (celdas rojas)..... | 74 |
| Tabla 22. Datos faltantes de la estación Aguascalientes II (1097) para el periodo de 1970-2013. Por el método de US National Weather Service. | 76 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

| | |
|--|-----|
| Tabla 23. Consideraciones para el cálculo de la precipitación media. Método de P. de Thiessen. | 77 |
| Tabla 24. Precipitación media mensual para cada registro por Método de Polígonos de Thiessen. | 77 |
| Tabla 25. Determinación del parámetro K en la CE. | 79 |
| Tabla 26. Coeficientes de escurrimientos anuales de la CE. | 80 |
| Tabla 27. Lámina de escurrimiento anual de la CE. | 81 |
| Tabla 28. Volúmenes de escurrimiento para cada año y el medio anual de la CE. | 82 |
| Tabla 29. Precipitaciones medias mensuales de cada registro que rebasan la media mensual de su respectivo año. Por el método de relación lluvia-escurrimiento. | 83 |
| Tabla 30. Porcentajes de las precipitaciones medias mensuales de cada registro que rebasan la media mensual de su respectivo año. Por el método de relación lluvia-escurrimiento. | 84 |
| Tabla 31. Volúmenes de escurrimiento mensuales. | 85 |
| Tabla 32. Coordenadas geográficas de los electrodos (1 y 24) y geófonos (1 y 24) | 87 |
| Tabla 33. Descripción de los sondeos eléctricos. | 89 |
| Tabla 34. Gasto medio del vaciado y lámina máxima creada con ese gasto. | 90 |
| Tabla 35. Perfiles de resistividades de los sondeos. | 93 |
| Tabla 36. Coordenadas geográficas de los geófonos 1 y 24. | 94 |
| Tabla 37. Observaciones ante la relación de los perfiles de prospección geofísica. | 99 |
| Tabla 38. Distribución mensual del volumen de escurrimiento medio anual en la CE. | 100 |
| Tabla 39. Comportamiento mensual de los volúmenes de almacenamiento en el embalse en el primer año de operación. | 102 |
| Tabla 40. Comportamiento mensual de los volúmenes de almacenamiento en el embalse en el segundo año de operación. | 102 |
| Tabla 41. Dimensiones del embalse propuesto. | 103 |
| Tabla 42. Límites establecidos del agua a infiltrar antes de la operación. | 106 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Regiones climáticas en México 14

Figura 2. Regiones Hidrológicas Administrativas..... 15

Figura 3. Extracción de agua por tipo de origen en cada Región Hidrológica Administrativa del año 2013. 16

Figura 4. Usos consuntivos del agua en el Estado de Aguascalientes. 17

Figura 5. Volúmenes de extracción de las fuentes de abastecimiento del agua en el Estado de Aguascalientes. 18

Figura 6. Usos consuntivos del agua subterránea en Aguascalientes. 18

Figura 7. Cartografía de fallas en el valle de Aguascalientes. 20

Figura 8. Identificación de los bloques de techo y muro, tomando como referencia el buzamiento de la falla y el tipo de falla según su desplazamiento vertical. 29

Figura 9. Graben de Aguascalientes delimitado por las fallas normales Oriente y Poniente. 30

Figura 10. Provincias y subprovincias fisiográficas en el Estado de Aguascalientes. ... 34

Figura 11. Topoformas o relieves que caracterizan al Estado de Aguascalientes. 34

Figura 12. Geología característica en el Estado de Aguascalientes. 35

Figura 13. Unidades climáticas en Aguascalientes..... 36

Figura 14. Estaciones climatológicas en operación en el Estado de Aguascalientes... 37

Figura 15. Curvas hipsométricas características del tipo geológico de cuencas. 42

Figura 16. Medidas tomadas a partir del arreglo Dipolo-Dipolo en 2D. 52

Figura 17. Trayectorias de las ondas de refracción sísmica. 54

Figura 18. Ubicación de la zona de estudio en el Estado de Aguascalientes..... 56

Figura 19. Localización geográfica de la zona de estudio 57

Figura 20. Movimiento de terracerías, inmediatamente después de cruzar puente, teniendo acceso por la C. Rosa Minutte del Fracc. El Rosedal..... 57

Figura 21. Ligero despilme de camino hacia la Falla Oriente desde el acceso Arroyo de la Hacienda con la calle Rosa Minutte del Fracc. El Rosedal. 57

Figura 22. Toma de puntos de control con equipo GPS de doble frecuencia Mca. ASTECH, modelo PROMARK-500. 58

Figura 23. Levantamiento topográfico con estación total Mca. Sokkia modelo 630-RK 58

Figura 24, Primer levantamiento topográfico y trazo de discontinuidades geológicas.. 58

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

| | |
|---|----|
| Figura 25. Complemento de levantamiento topográfico y trazo de discontinuidades geológicas..... | 58 |
| Figura 26. Localización del punto de referencia donde el Arroyo la Hacienda intercepta a la Falla oriente..... | 59 |
| Figura 27. Área y perímetro de la CE. | 60 |
| Figura 28. Área y Longitud de la cuenca (Lc). | 61 |
| Figura 29. Superficie entre elevaciones para la Curva hipsométrica. | 62 |
| Figura 30 Curva hipsométrica de la CE. | 63 |
| Figura 31. La cuenca pertenece a la Subcuenca Hidrográfica RH12Ib..... | 65 |
| Figura 32. Provincia y subprovincia fisiográfica a la que pertenece la CE. | 66 |
| Figura 33. Topoformas o relieves que caracterizan a la CE. | 66 |
| Figura 34. Características geológicas en la CE..... | 67 |
| Figura 35. Unidades climáticas presentes en la CE..... | 68 |
| Figura 36. Estaciones climatológicas que influyen en la CE, a partir del método de polígonos de Thiessen. | 69 |
| Figura 37. Distancias entre las estaciones de influencia en la CE y las estaciones circundantes más cercanas..... | 70 |
| Figura 38. Coberturas y usos de suelo en la CE. | 78 |
| Figura 39. Texturas que clasifican el tipo de suelo en la cuenca. | 79 |
| Figura 40. Discontinuidad geológica en el punto donde se trabajaron los estudios geofísicos..... | 86 |
| Figura 41. Abertura aproximada entre Techo y piso, y la profundidad aproximada sin azolves de la discontinuidad en el punto de estudio..... | 86 |
| Figura 42. Localización del punto de estudio, en el cual se desarrollaron los métodos geofísicos..... | 86 |
| Figura 43. Tendido de Electrodo de manera ortogonal a la discontinuidad geológica..... | 87 |
| Figura 44. Resistivímetro IRIS-SYSCAL conectado a una fuente de corriente continua y al tendido de cables..... | 88 |
| Figura 45. Electrodo conectado al tendido del cableado. | 88 |
| Figura 46. Vaciado de agua potable en el punto de pruebas..... | 88 |
| Figura 47. Lámina de agua que se presenta al vaciar un gasto..... | 88 |
| Figura 48. Representación de perfil 2D de CVES en zona de estudio..... | 89 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Figura 49. Consideración del comportamiento del agua al vaciarse directamente en la discontinuidad. 90

Figura 50. Consideración a la sección transversal de la discontinuidad. 91

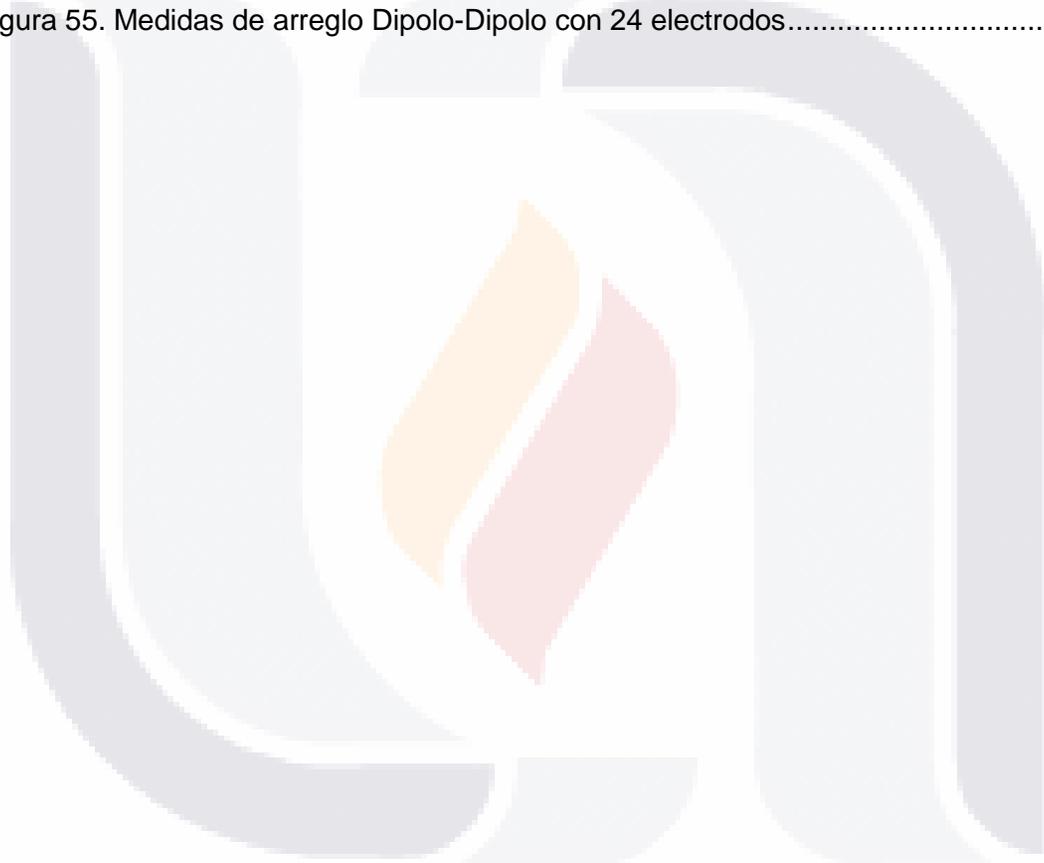
Figura 51. Tendido de Geófonos de manera ortogonal a la discontinuidad geológica. 94

Figura 52. Representación de perfil 2D de refracción sísmica en zona de estudio 95

Figura 53. Perfil de velocidades de ondas P a partir de refracción sísmica, resaltando la zona donde se presenta la Falla oriente..... 96

Figura 54. Relación de los perfiles obtenidos de los métodos de prospección geofísica99

Figura 55. Medidas de arreglo Dipolo-Dipolo con 24 electrodos..... 121



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

ACRÓNIMOS

CE: Cuenca hidrógrafica de estudio

Es la microcuenca a la cual se le hacen los estudios hidrológicos en este trabajo de Tesis.

CONAGUA: Comisión Nacional del Agua

organismo administrativo desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, creado en 1989, cuya responsabilidad es administrar, regular, controlar y proteger las aguas nacionales en el país. Dentro de su estructura se encuentra el Servicio Meteorológico Nacional.

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

Organismo público con autonomía técnica y de gestión, personalidad jurídica y patrimonio propios, responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica, así como de realizar los censos nacionales.

MDE: Modelo digital de elevación

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

RH: Región Hidrológica

De acuerdo a los trabajos realizados por la Conagua, el INEGI y el INE, se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales.

RHA: Regiones Hidrológico-Administrativas

Circunscripción territorial de los organismos de cuenca que administran las aguas nacionales e incorporación de nuevos municipios.

SIG: Sistema de información geográfica

Conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

RESUMEN

Frente a las problemáticas del desabasto de agua y del fracturamiento en el valle de Aguascalientes, en el presente estudio se analiza el comportamiento hidráulico de una porción de la Falla oriente ante la infiltración de agua proveniente de los escurrimientos superficiales, y con ello detectar si es factible aprovechar estas discontinuidades geológicas como ductos para la recarga artificial del sistema acuífero. La metodología empleada consistió primero en seleccionar una porción de la Falla oriente que cumpliera con ciertos criterios, de tal modo que tuviera condiciones para el vertido intencional de agua potable; en seguida, se elaboró un análisis de cuenca para estimar el volumen de escurrimiento superficial medio, mismo que se aporta a la porción seleccionada de la falla; se realizaron pruebas de campo de vertido de agua para determinar la capacidad de captación de la porción de falla; finalmente, se implementaron los métodos geofísicos de sondeo eléctrico continuo (CVES), que se utilizó para inferir el comportamiento del agua que se infiltra a la discontinuidad; y el de refracción sísmica, cuyos resultados se compararon de manera general con los sondeos eléctricos continuos. Esto con el fin de detectar alguna relación estratigráfica a partir de las velocidades de ondas P y las resistividades aparentes. A partir del análisis de cuenca se estimó un volumen de escurrimiento medio de $816,973.89 \text{ m}^3$ anuales. Dicho valor se comparó con la capacidad de captación de agua de la porción de falla y se estimó que se requiere una longitud aproximada de falla de 234.62 m para recargar dicho volumen, puesto que al verter directamente agua potable en la falla se encontró que demanda un gasto de $0.1325 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual se distribuye 20 m a lo largo de la falla. Por otro lado, los sondeos eléctricos mostraron pequeñas variaciones en las resistividades; lo que permitió inferir que el agua infiltrada se desplaza de manera longitudinal a la falla. Así mismo, una comparación sobresaliente entre los métodos geofísicos, es donde se encuentra la discontinuidad geológica y en la cual las resistividades en el CVES son muy altas ($2,300 \Omega\text{-m}$), y las velocidades de las ondas sísmicas obtenidas en el sondeo de refracción sísmica son muy bajas (200 m/s), por lo que se cree que es un suelo poco consolidado y afectado por la falla. Se supone que la Falla oriente se puede estar comportando como un conducto directo, puesto que demanda un gasto de 132.5 l/s . Por otro lado, si se considerará aportar el volumen de escurrimientos calculados, el déficit ante la disponibilidad del acuífero para aportar

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

agua disminuiría un 0.66% (-123.473 hm³). Esto nos indica que la aportación de los escurrimientos superficiales de las distintas cuencas hidrológicas donde sus cauces principales se vean afectados por el cruce de una discontinuidad geológica con potencial de recarga del acuífero, podrían atenuar la problemática del déficit presente en el valle de Aguascalientes.



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

ABSTRACT

To face the problem of the shortage of water and fracturing in Aguascalientes's Valley, in the present study the hydraulic response of a portion of the Falla Oriente to infiltration of water from surface runoffs, and to detect if it is feasible to take advantage of these geological discontinuities as a duct for artificial recharge of the aquifer system is analyzed. The used methodology consisted first in select a portion of the Falla Oriente that meets some criteria, so that had conditions for intentional discharge of potable water; after this, a basin analysis was elaborated to estimate the medium volume of surface runoff, which is going to be provided to the select portion of the Fault; field tests of pouring water were conducted to determine the capacity to capture of the portion of fault; finally, geophysical methods of continuous electrical sounding were implemented (CVES), used to infer the behavior of water as it infiltrates into the discontinuity; and seismic refraction, whose results were generally compared with continuous electrical soundings. This in order to detect any stratigraphic relation from P waves velocities and apparent resistivities. From the basin analysis, an average volume of 816,973.89 m³ annual runoff was obtained. This value was compared with the capacity of water uptake of the fault portion, and it was estimated that an approximate length of 234.62 m of fault is required to recharge the volume, since by pouring potable water directly on the fault it was found that it demands a volume rate of 0.1325 m³/ s, which is distributed 20 m along the fault. On the other hand, the electrical soundings showed small variations in resistivity; allowing infer that the infiltrated water moves longitudinally to the failure. Likewise, an outstanding comparison of geophysical methods, is where the geological discontinuity is placed, in which resistivities in the CVES are very high (2.300 Ω -m), and the wave speeds obtained from seismic refraction survey are very low (200 m / s), so is believed that this is a soil affected by the fault is poorly consolidated. It is suggested that Falla Oriente may be behaving as a direct conduit, since it demands a volume rate of 132.5 l / s. On the other hand, if the runoff volume is considered in the computations, the deficit to the availability of the aquifer to provide water decrease down to 0.66% (-123,473 hm³). This indicates that the contribution of surface runoff from different basins where its main channels are affected by a geological discontinuity with potential aquifer recharge, the problem of the water deficit in the valley of Aguascalientes could be attenuated.

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La escasez del recurso hídrico

El agua, como recurso natural renovable, es vital para la supervivencia de todo ser vivo y el bienestar de los seres humanos, también es muy importante para muchos sectores de la economía. Este recurso se encuentra repartido en el planeta de manera no uniforme y está siendo agotada por actividad antropogénica.

Ya que el agua se encuentra de manera no uniforme en el planeta, tal como lo expresan (Shiklomanov y Rodda, 2004), del porcentaje total de este recurso el 2.53% es agua de dulce, que equivale a 35'029,200 km³, donde un poco menos de tres cuartos son glaciares y un cuarto restante, aguas subterráneas. Del agua dulce total, solamente un 0.4% se encuentra en aguas superficiales y en la atmosfera, e incluye a plantas y animales.

Con estos datos, se observa que el agua dulce corresponde a una pequeña proporción del agua en el planeta. Aunado a esto, existe un mal uso de este recurso, es por eso que la escasez empieza a ser un foco de alerta para diversas regiones del planeta.

Por otro lado, dado que en la atmosfera se encuentra una cantidad de agua dulce su ciclo representa un proceso importante para determinar la cantidad de agua disponible debido a la precipitación. Hay regiones en el mundo que sólo dependen de la precipitación para su subsistencia. Según GreenFacts (2014), el volumen de precipitaciones para climas desérticos es de 100 mm al año mientras que en las zonas tropicales asciende a más de 3400 mm al año.

Dentro del ciclo del agua la evaporación tiene un papel importante, ya que depende del clima. El volumen de agua evaporada es mayor cuando el clima es más seco, en consecuencia sólo se podrá utilizar una mínima cantidad del agua precipitada. En muchos casos el clima, específicamente en los períodos de sequía, aumenta la sobreexplotación del recurso hídrico.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

En la Tabla 1.1 se observan los comportamientos del agua en porcentajes dependiendo de las diferentes regiones climáticas en el mundo.

Tabla 1. Distribución de las precipitaciones entre aguas superficiales y subterráneas (por regiones climáticas). Basado de lo publicado por GreenFacts, (2014a).

| | Clima templado | | Clima semiárido | | Clima árido | |
|--------------------------------|----------------|-----------|-----------------|---------|-------------|-------|
| | % | mm | % | Mm | % | mm |
| Precipitación total | 100 | 500–1,500 | 100 | 200–500 | 100 | 0–200 |
| Evaporación/Evapotranspiración | ~ 33 | 160–500 | ~ 50 | 100–250 | ~ 70 | 0–140 |
| Recarga de aguas subterráneas | ~ 33 | 160–500 | ~ 20 | 40–100 | ~ 1 | 0–2 |
| Escurrimiento superficial | ~ 33 | 160–500 | ~ 30 | 60–150 | ~ 29 | 0–60 |

En consonancia con lo anterior, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010), señala que en México se encuentran tres tipos de clima que se clasifican en cálido, seco y templado; esto se visualiza en la figura 1.1.



| | |
|---|--|
| | CALIDOS, SUBGRUPOS DE CLIMAS CALIDOS |
| 1 | CALIDO HUMEDO |
| 2 | CALIDO SUBHUMEDO |
| | SECOS |
| 3 | SECO |
| 4 | MUY SECO |
| | TEMPLADO, SUBGRUPOS DE CLIMAS TEMPLADOS |
| 5 | TEMPLADO SUBHUMEDO |
| 6 | TEMPLADO HUMEDO |

Figura 1. Regiones climáticas en México de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (2010). *Clima en México.*

Recuperado el 20 de abril de 2014, de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80, basado de datos del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, s.f.).

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

El clima de cada región tiene incidencia en la precipitación, la (CONAGUA, 2012) con las Estadísticas del Agua en México del 2011, refiere que en el país llueve una media de 1,489 km³ al año, de los cuales, se evapora del suelo y transpira de la vegetación (evapotranspiración) un 73.1% regresando a la atmósfera. El 22.1% escurre por ríos y arroyos y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Con estos datos y considerando otros factores que recargan los acuíferos y quedan en la superficie en México, se cuenta con 460 millones de metros cúbicos de agua renovable.

La CONAGUA determina la circunscripción territorial que permite mejorar la administración de las aguas nacionales e incorporar nuevos municipios a través de 13 organismos de cuenca, también llamadas Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA). Aunado a esto el Estado de Aguascalientes se encuentra dentro de la RHA-VIII, llamada Lerma-Santiago-Pacífico (Sistema Nacional de Información del Agua, 2012b). En la siguiente figura se muestran las RHA:

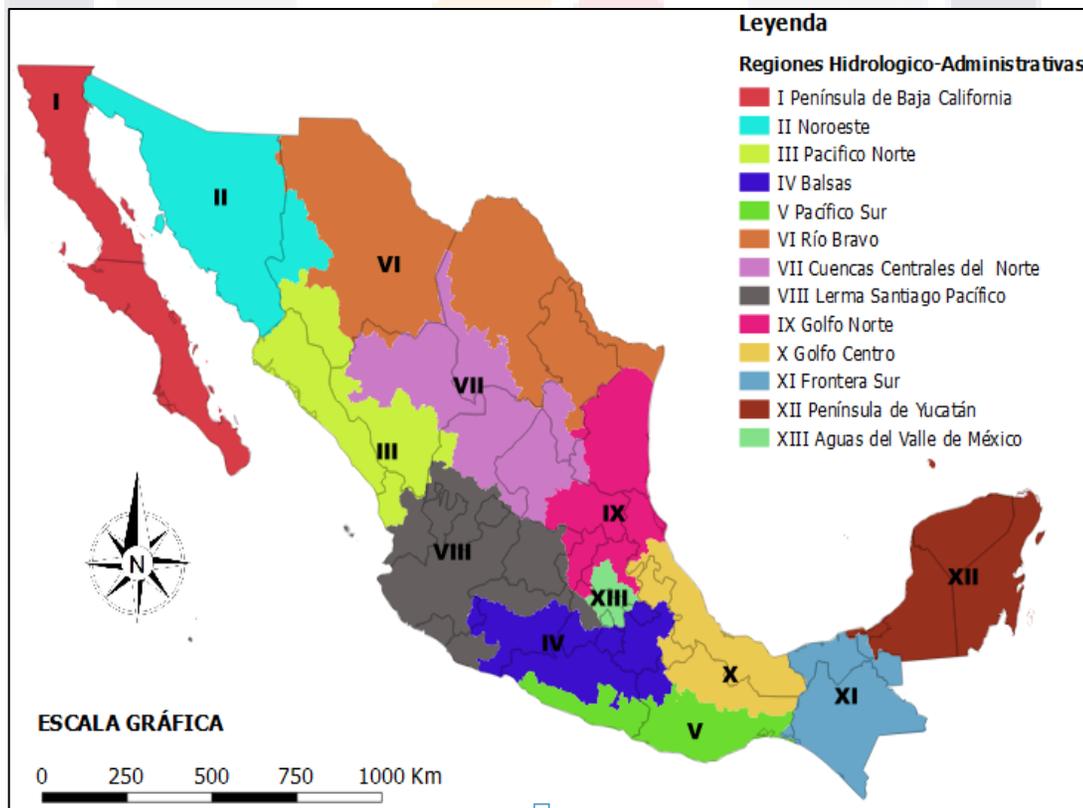


Figura 2. Regiones Hidrológicas Administrativas. Basado en la información obtenida de CONAGUA, (2009).

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

La CONAGUA (2014) refiere que el uso consuntivo de las aguas renovables en la RHA-VIII predominan en el uso del sector agropecuario con un 82%, siguiéndole el uso para abastecimiento público con un 14%, la industria autoabastecida con 4% y la energía eléctrica excluyendo hidroelectricidad con 0%.

Con lo anterior, cabe señalar que el uso consuntivo de la RHA-VIII depende de las aguas contenidas en los acuíferos, siendo un poco más del cincuenta por ciento. Sin embargo, comparada con las otras regiones, la de Lerma-Santiago-Pacífico supera por mucho el uso de las aguas subterráneas, como se observa en la figura 1.3.

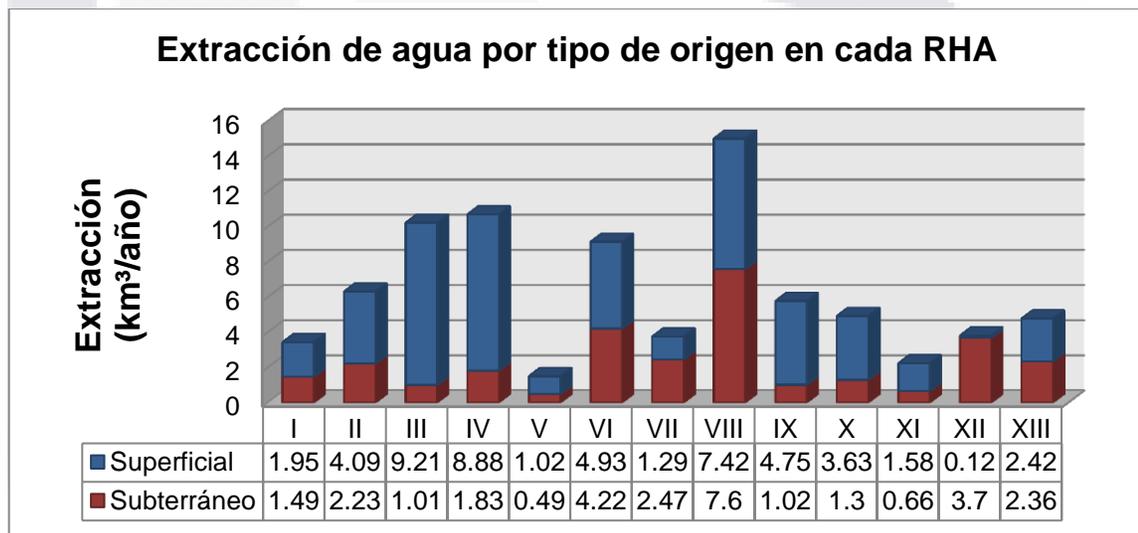


Figura 3. Extracción de agua por tipo de origen en cada Región Hidrológica Administrativa del año 2013.

De acuerdo al documento Estadísticas del Agua en México, edición 2014 (CONAGUA, 2014).

Recuperado el 26 de abril de 2016, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>.

Como lo publica el Gobierno del Estado de Aguascalientes (2010), la entidad federativa presenta un clima semiseco en la mayoría de su cobertura, siendo aproximadamente el 86.30% y el resto con clima templado, que se presenta al S-W y al N-W del Estado. La temperatura media anual es de 17.4°C y su precipitación media anual de 526 mm. Así mismo el Comité Técnico de Aguas Subterráneas COTAS (2010), menciona que existe una evaporación potencial media anual aproximada de 2,200 mm. Lo anterior, refleja que es mucho mayor el agua que se evapora que la que llega a precipitarse. Es por ello que, en el Estado, las características climáticas impiden las fuentes de agua superficial (ríos, arroyos, lagos, etcétera) se mantengan con agua durante todo el año.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

De igual forma, en la entidad federativa no se cuenta con corrientes fluviales de gran caudal, la mayoría son intermitentes; es decir, los cauces o lechos de río drenan el agua en presencia de precipitaciones (Gobierno del Estado de Aguascalientes 2010-2016, 2010).

La CONAGUA (2014) menciona que para ésta entidad federativa el volumen requerido para los usos consuntivos en el año 2013 fue de 618.40 hm³ del cual en su mayoría se usa para uso agrícola, Gráfica 1.2.

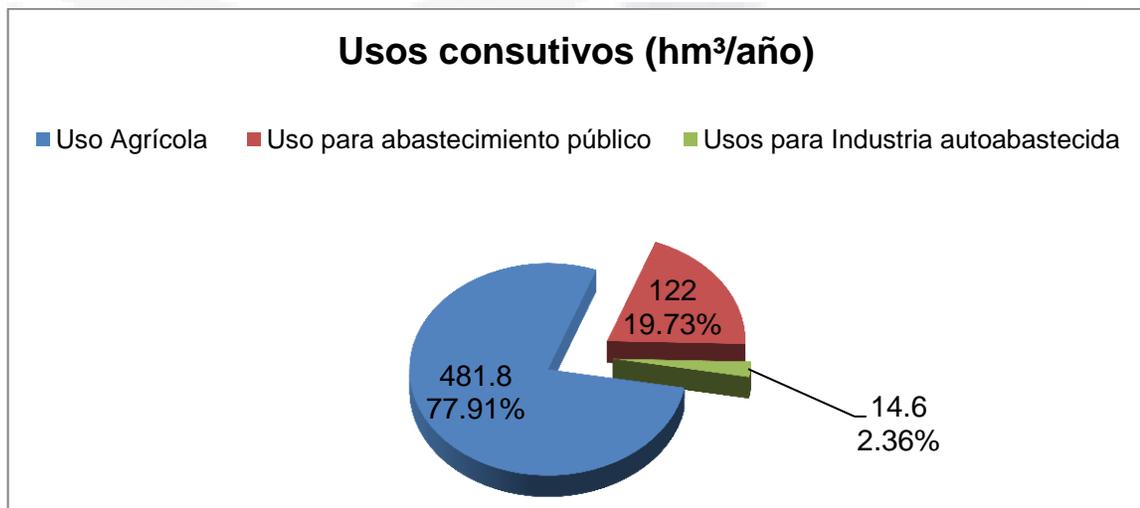


Figura 4. Usos consuntivos del agua en el Estado de Aguascalientes. Basado en la información del documento Estadísticas del Agua en México, edición 2014 (CONAGUA, 2014). Recuperado el 26 de abril de 2016, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>

En este contexto podemos destacar que los volúmenes de extracción del recurso hídrico para el Estado dependen de dos fuentes de abastecimiento, que son: superficiales y subterráneas. La única fuente de abastecimiento superficial son los embalses de almacenamiento, los cuales aportan solamente el 29% de la demanda total del estado, siendo casi en su totalidad para uso agrícola; el 71% restante de la demanda total proviene de la fuente subterránea, requiriendo más de la mitad de este porcentaje para el uso agrícola. Los porcentajes del abastecimiento total de las fuentes se pueden observar gráficamente en la siguiente figura:

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

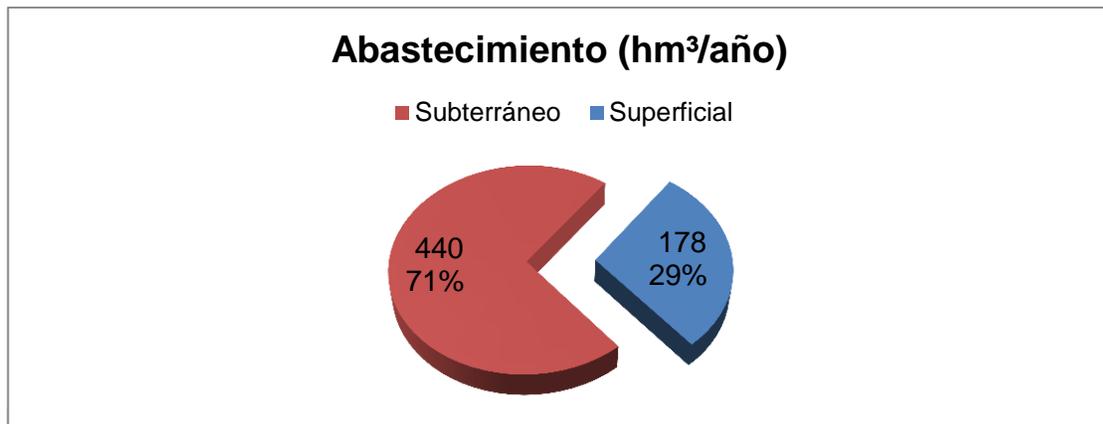


Figura 5. Volúmenes de extracción de las fuentes de abastecimiento del agua en el Estado de Aguascalientes.

Basado en la información del documento Estadísticas del Agua en México, edición 2014 (CONAGUA, 2014). Recuperado el 26 de abril de 2016, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>

En el Estado se localiza el acuífero “Ojocaliente-Aguascalientes-Encarnación”. Dicho acuífero es compartido con los estados de Zacatecas y Jalisco. Con lo anterior CONAGUA (2014) refiere que la extracción y uso del agua subterránea en el valle de Aguascalientes es de 440.4 millones de m³ para el año 2013, y en lo que más es usada es en el sector agrícola con un 69%; un 28% para uso público-urbano y con 3 % para lo industrial, ver figura siguiente:

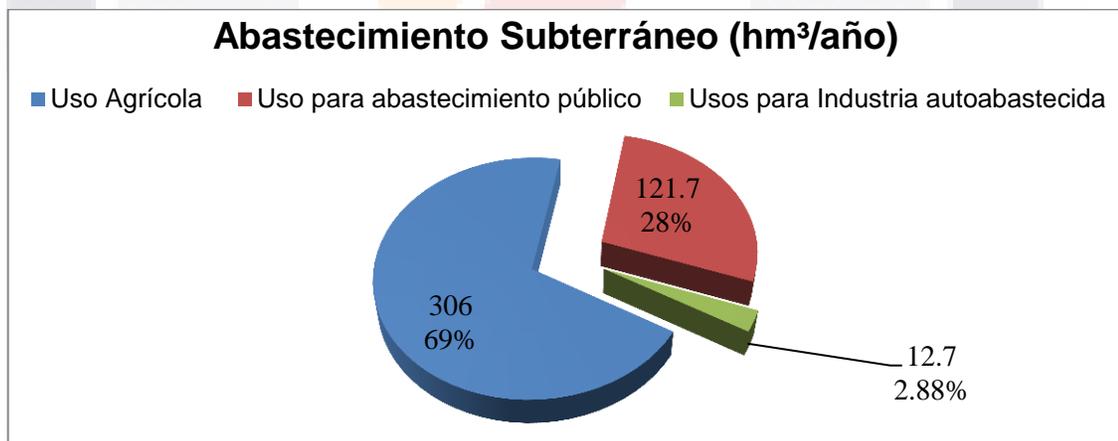


Figura 6. Usos consuntivos del agua subterránea en Aguascalientes.

Basado en la información del documento Estadísticas del Agua en México, edición 2014 (CONAGUA, 2014). Recuperado el 26 de abril de 2016, de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>

Es muy importante destacar que en el acuífero del Valle se tiene una disponibilidad negativa de 124.29 hm³. Este déficit proviene de la suma algebraica de la recarga total media anual (+235 hm³) con la descarga natural comprometida (-10 hm³) y el volumen

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

concesionado (-349.29 hm³). Lo anterior es determinado conforme al método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 (COTAS, 2010)

En resumen, se puede señalar que el recurso hídrico es sometido a un uso inapropiado o excesivo, y es afectado por diferentes factores, algunos de estos son: las actividades humanas relacionadas con el crecimiento demográfico y poblacional, la contaminación y el nivel socioeconómico de las personas.

En términos generales el incremento en la demanda del agua subterránea es una problemática muy seria que el Estado de Aguascalientes enfrenta debido a la escasez del vital líquido. A pesar del decreto de veda publicado en el año de 1963, que lleva por título: *“Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende todo el estado de Aguascalientes”* (Diario Oficial de la Federación, 1963), se han presentado algunas secuelas debido a la intensa sobreexplotación de los acuíferos, como lo son: el incremento de los gastos de extracción y la degradación del suelo, que puede manifestarse como discontinuidades geológicas que afectan la infraestructura urbana, edificios y casas habitación (Gobierno del Estado de Aguascalientes 2010-2016, 2010).

Haciendo énfasis a lo anterior, en Aguascalientes el fenómeno de la subsidencia se ha visto reflejado a finales de la década de los 70's, que fue cuando se intensificó la extracción del agua subterránea por bombeo. Es por eso que la deformación superficial (subsidencia del terreno y fallas superficiales) puede estar ligada a la extracción del agua subterránea. Cabe hacer mención, que observaciones recientes sugieren que las discontinuidades superficiales son provocadas por las tensiones geológicas naturales, al menos en el origen de ellas (Hernández-Marín et al., 2015). Así mismo, la Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes (2010) resalta que *“no se descarta la posibilidad de movimientos tectónicos que puedan producir también hundimiento en el terreno, aunque esto es un poco difícil de probar”*.

En el estado de Aguascalientes la presencia de un par de discontinuidades geológicas con un rumbo aproximado N-S, limitan el graben de Aguascalientes. Estas dos discontinuidades geológicas son conocidas como la Falla Oriente y la Falla Poniente.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

En el graben de Aguascalientes es donde se concentra la deformación superficial en forma de subsidencia y fallas superficiales.

La cartografía de las fallas en el valle de Aguascalientes puede ser visualizada en la figura 7, resaltando que una alta concentración de fallas se localiza en la ciudad capital. Como se mencionó anteriormente en el acuífero del Valle de Aguascalientes existe un déficit, debido a la extracción de las aguas subterráneas, lo cual puede estar generando este tipo de deformación en el terreno (COTAS, 2010).

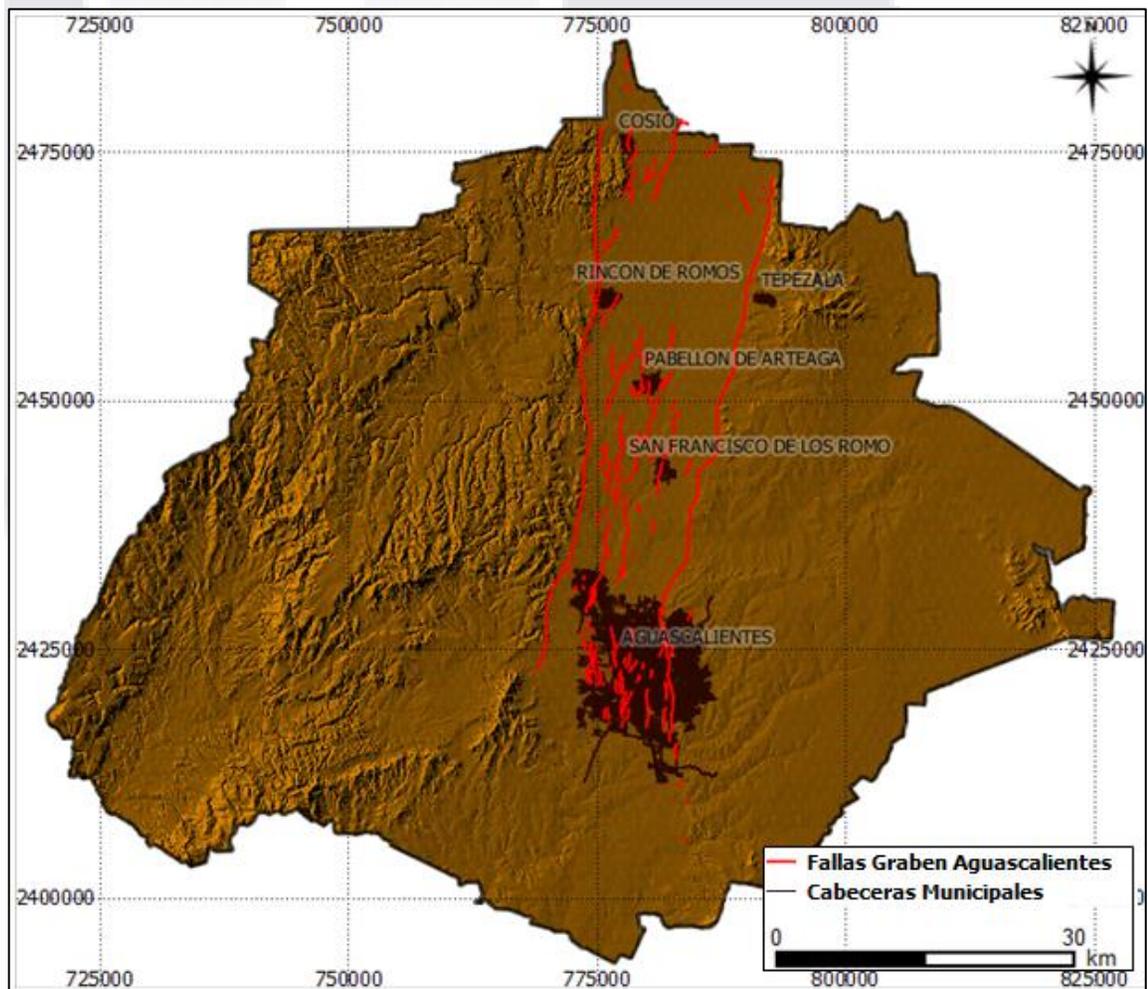


Figura 7. Cartografía de fallas en el valle de Aguascalientes. Elaborado a partir de la cartografía de Sistema de Información de Fallas Geológicas y Grietas - SIFAGG (Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2010).

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Ante esta situación es imperativo hacer un uso racional del agua, así como el buen aprovechamiento de la misma. Ya que la escasez del recurso hídrico complica el progreso de todos los sectores, repercutiendo de manera seria sobre la economía. Que a su vez, se cree que la demanda del recurso se seguirá incrementando, primordialmente en los sectores industriales y público urbano. Así mismo el cambio climático puede agravar la disponibilidad debido a sus sequías extremas (INAGUA, 2010).

Una alternativa para esto último radica en conocer la factibilidad de generar recarga artificial en discontinuidades geológicas con potencial de infiltración; entendiendo por recarga artificial al aprovechamiento a partir de obras o actividades para la infiltración mediante disposición de aguas pluviales y escurrimientos superficiales mencionado en la NOM-015-CONAGUA-2007 (Diario Oficial de la Federación, 2009), lo que permita que parte de los escurrimientos superficiales debidos a precipitaciones puedan ser utilizados como recarga del acuífero sobreexplotado, con lo que se beneficiaría el Estado de Aguascalientes.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

JUSTIFICACIÓN

El acuífero de Aguascalientes es fuertemente explotado y a partir ello existe un déficit en la disponibilidad del mismo. Lo cual está asociado a problemáticas de deformaciones en el suelo y calidad del agua. Es por ello que detectar si es factible que una porción de la Falla oriente pueda infiltrar agua proveniente de los escurrimientos superficiales, pueda disminuir el déficit presente en el acuífero.

HIPÓTESIS

En de éste trabajo se desea probar que la Falla oriente del valle de Aguascalientes se comporte como un conducto entre la superficie y el subsuelo, que permita la distribución y el desplazamiento del agua de fácil manera; esto a partir de las observaciones que resulten de la prospección geofísica eléctrica y el vaciado inducido de agua potable. Si se encuentra factible la infiltración del agua a través de la discontinuidad, el volumen de escurrimiento superficial producido en una cuenca hidrográfica, con una salida del cauce principal en la intercepción con la Falla oriente, se desearía probar que el aporte de este escurrimiento superficial disminuya el déficit de la disponibilidad de agua en el acuífero del valle de Aguascalientes.

OBJETIVO

Conocer la factibilidad de recarga artificial de una porción de la falla oriente del valle de Aguascalientes ante la infiltración de agua, aplicando una metodología que incluye análisis hidrológico, experimentación en campo mediante vaciado de agua potable directo en la falla para la estimación cuantitativa de volúmenes infiltrados, exploración geofísica somera de resistividad eléctrica para observar el desplazamiento del agua dentro del perfil, y de sísmica de refracción para establecer el comportamiento de las velocidades de las ondas P y comparar los perfiles de sísmica con los de resistividad para encontrar si existe relación física de los bloques mostrados entre los dos métodos.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

ANTECEDENTES

Comportamiento de las fallas o fracturas ante el flujo de agua

Se pueden encontrar en la literatura científica varios trabajos en los que se analiza el papel de zonas de falla de la dinámica de sistemas acuíferos. A continuación se analizan algunos de esos trabajos.

Bense et al. (2013) discuten la hidrogeología de zonas de falla para diversos tipos de rocas desde sedimentos clásticos no litificados y litificados a través de carbonato, cristales, y rocas volcánicas. Donde para cada tipo de roca, evaluaron los mecanismos geológicos de deformación, observaciones hidrogeológicas y modelos conceptuales de la hidrogeología de la zona de falla. Encontraron que las zonas de falla tienen la capacidad de ser conductos hidráulicos superficiales y profundos, aunque a menudo en el corazón de las fallas se forman barreras que impiden el flujo, lo cual permite que el flujo a lo largo de la falla sea fomentado, pero que transversal a ésta el flujo sea impedido.

Así mismo el trabajo de Moya et al. (2014), elaborado en Queensland, Australia, donde se evalúa, a partir de un modelo geológico/hidrogeológico tridimensional, la influencia de las fallas regionales sobre el flujo de aguas subterráneas en un acuífero/acuitardo, Estos autores concluyen que a partir de la modelación dentro de las cuencas Galilee y Erogama, las fallas probablemente desempeñan un papel fundamental como vías de conectividad hidráulica entre los acuífero-acuífero o entre acuífero-acuitardo.

Petrie et al. (2014) evaluaron una zona afectada por una falla en “Cedar Mesa Sandstone”, al sureste de Utah. Donde encontraron que las moderadas presiones de confinamiento, posibles variaciones en la presión de poro, porosidad, así como también la naturaleza del grano fino en el área producen una zona de afectación de fallas, misma que se caracteriza por el aumento de la permeabilidad y la mineralización. Lo cual sugiere que las bandas de deformación y las venas de calcita actuaron como vías para los fluidos debido a la mineralización presente. Por lo que identificaron que esta falla y su zona de afectación tiene importancia debido al flujo de fluidos en el subsuelo.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Aplicación de Métodos geofísicos para la identificación de zonas con saturación

Flores et al. (2001) realizaron una caracterización geofísica del fuertemente sobreexplotado acuífero del valle Elta, en Oaxaca, México. Donde específicamente la tomografía eléctrica les permitió identificar las profundidades de las unidades con contenido de agua, al igual que la configuración estratigráfica. Esto a partir de varios perfiles en la porción sur del valle.

En el mismo contexto Sequeira Gómez y Escolero Fuentes (2010), utilizaron métodos geofísicos eléctricos en la exploración de los recursos de agua subterránea en la sub-cuenca del Río Malacatoya, Nicaragua. Los resultados obtenidos les permitieron identificar los espesores de los acuíferos, además de concluir que el flujo de los fluidos es a través de medios porosos y en algunas unidades el flujo es a través de medios fracturados (acuíferos semiconfinados).

Molina-Padrón (2006) realizó una comparación en los métodos de resistividad eléctrica en 1-D y 2-D, por configuraciones tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de programas computacionales que realizan la inversión de los datos. Teniendo como resultado que para los perfiles 2-D sus arreglos arrojan información precisa, y de entre ellos el que mejor delimita las unidades es el Dipolo-Dipolo, ya que produce mayor cantidad de mediciones.

Proyecto de recarga artificial del sistema acuífero del valle de Aguascalientes

De entre los casos de recarga artificial de acuíferos, resalta por el hecho de ser un proyecto para aplicarse en el valle de Aguascalientes, el que el Instituto del Agua del Estado de Aguascalientes (INAGUA), ha impulsado para abastecer la ciudad de Aguascalientes y cuyo nombre completo oficial es Plan de Recarga Artificial del Acuífero del Valle de Aguascalientes (INAGUA, 2010). Mediante este proyecto, que incluye modelación numérica, se pretende alcanzar la sostenibilidad del acuífero y revertir el abatimiento de los niveles de agua. Entre sus resultados proponen usar 5 Sistemas de Recarga Artificial a partir de unos pozos de inyección con aguas tratadas, que operen de manera independiente. Cabe mencionar que proponen dar un tratamiento que cumpla con la NOM-014-CONAGUA-2003 del 18 de Agosto del 2009. Así mismo, en el Plan de Recarga Artificial del Acuífero del Valle de Aguascalientes, se

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

analizaron las balsas de infiltración, a partir de modelos numéricos que les permitieron estimar y predecir aproximadamente el tiempo que demora el agua en la superficie a llegar al nivel freático. Encontrando en una de sus modelaciones que el agua en balsas de infiltración tardaría más de 5 años en llegar al acuífero, para un caudal de 75 l/s y se ocuparía una superficie de 2 Km². Entre sus conclusiones, recomiendan que el mejor método para realizar recarga artificial en Aguascalientes es por medio de pozos de inyección directa, cuyos efluentes tratados provendrían de 8 plantas de tratamiento de aguas residuales, y que el volumen a tratar sería de 31.0 millones de metros cúbicos al año (hm³/año), cumpliendo así con la norma mexicana de 24.8 hm³/año.

Normativa aplicable a la recarga de acuíferos

A partir de que este estudio pretende conocer la infiltración de una porción de la falla oriente en el valle de Aguascalientes, es necesario mencionar que se pretende detectar si se pueden recargar escurrimientos superficiales a través de esta porción de falla. Respecto a la calidad del agua que pueda ser infiltrada, es algo que esta fuera de los alcances de este estudio, sin embargo se menciona la normativa que se debiera considerarse para realizar recarga artificial de los acuíferos en el Valle de Aguascalientes, México.

La principal Norma Oficial Mexicana es la NOM-015-CONAGUA-2007 del 18 de Agosto del 2009, Infiltración Artificial de Agua a los acuíferos - Características y especificaciones de las obras y el agua. Los objetivos de ésta norma, citados textualmente son: *“Proteger la calidad del agua de los acuíferos”* y también *“aprovechar el agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial”*. Así mismo, menciona en algunas de sus especificaciones datos sobre la calidad del agua que se pretenda infiltrar, así como los límites permisibles de contaminantes que puedan afectar la calidad del agua nativa, refiriéndose como agua nativa a aquella contenida naturalmente en el acuífero.

A partir de esto, existen las siguientes normativas que van inmiscuidas para el uso y calidad del agua, administración de los bienes, contaminación de acuíferos y su prevención, entre otros. La tabla 2 resume la información de estas normativas:

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 2 Normativa a considerar para la recarga artificial.

| Normativa | Clave | Título |
|---|-----------------------------|---|
| Constitución Política De Los Estados Unidos Mexicanos | Artículo 27 | La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada. |
| Ley De Aguas Nacionales | Art. 113 | La administración de los siguientes bienes nacionales queda a cargo de "la comisión" |
| Norma Oficial Mexicana SEMARNAT | NOM-001-SEMARNAT-1996 | Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. |
| | NOM-002-SEMARNAT-1996 | Que establece lo límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. |
| | NOM-003-SEMARNAT-1997 | Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. |
| | NOM-004-SEMARNAT-2002 | Protección ambiental - lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. |
| | NOM-052-SEMARNAT-2002 | Establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos |
| Norma Oficial Mexicana CONAGUA | NOM-011-CONAGUA-2000 | Conservación del recurso agua - que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales |
| | NOM-014-CONAGUA-2003 | Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada |
| | NOM-015-CONAGUA-2007 | Infiltración artificial de agua a los acuíferos - características y especificaciones de las obras y el agua |
| Normas Internacionales | ISO/CD5667-11-2006 | Water quality-sampling-part11: guidance on sampling of ground waters. |
| | ISO 15839:2003 | Water quality-on-line sensors/analysing equipment for water-specifications and performance tests. |
| | ISO 5667-8:1993 | Water quality-sampling-part 8: guidance on the sampling of wet deposition. |
| | ISO 15175:2004 | Soil quality-characterization of soil related to groundwater protection. |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través
de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes



CAPÍTULO I

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Hidrología superficial

1.1.1. Geomorfología de la cuenca

La geomorfología es el estudio de la forma de la tierra. En este trabajo se determinaron algunos de los rasgos geomorfológicos de la cuenca de estudio que son más relevantes, principalmente los que permitan determinar los escurrimientos superficiales de escala mensual y anual.

1.1.1.1. Cuenca hidrográfica

Partiendo de lo anterior, una cuenca hidrográfica es la totalidad del área drenada por una corriente o por una red de cauces interconectados, donde todo el escurrimiento que se crea en tal superficie solo descarga en una única salida. La cual es delimitada por una línea imaginaria llamada “parteaguas”, ésta línea es el contorno de la cuenca, que se traza a partir de la topografía y divide a las cuencas una de otra, permitiendo distribuir el escurrimiento producido por la precipitación (Campos-Aranda, 1984).

Algunos aspectos geomorfológicos de la cuenca hidrográfica que se consideraron en este estudio son: el área, su forma, su curva hipsométrica, la elevación media, su pendiente media y la red de drenaje.

Las condiciones naturales de cada cuenca hidrográfica resultan ser aspectos importantes a considerar para la estimación, interpretación y discusión de un estudio hidrológico. Algunos aspectos son: la hidrografía, fisiografía, geología y la climatología. Donde estos aspectos son exclusivos para cada cuenca y dependen de su posición geográfica.

1.1.2. Volumen de escurrimiento superficial

El escurrimiento superficial de una cuenca hidrográfica, son las aguas derivadas de las aguas pluviales que transitan por la superficie de la cuenca y llegan al punto de más bajo de la cuenca o la salida del cauce principal.

Para cuencas no aforadas la estimación del volumen de escurrimiento superficial usualmente es calculado para conocer las dimensiones de los proyectos de

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

almacenamiento (Martínez-Martínez, 2011b). En este documento, el estudio del volumen de los escurrimientos tiene como meta estimar el volumen que puede ser infiltrado en una discontinuidad geológica. Cabe señalar que en este trabajo se estimó el volumen de escurrimiento a partir del Método del coeficiente de escurrimiento anual, el cual considera las distintas coberturas de la superficie del suelo y las precipitaciones anuales de la cuenca.

1.2. Discontinuidades geológicas

Para este documento el término “discontinuidad geológica” hará referencia a las fallas y fisuras. Las discontinuidades geológicas se pueden presentar de manera vertical, horizontal u oblicua. Donde las fallas en la corteza terrestre son fracturas que presentan desplazamientos considerables a lo largo de ellas. El bloque situado por encima de la zona de falla se le llama techo y el bloque de debajo se denomina como muro (Tarbuck y Lutgens, 2005).

Las fallas que cuentan con desplazamiento vertical son aquellas en las que el movimiento es fundamentalmente paralelo al buzamiento (o inclinación de la falla), lo cual produce un escarpe (escalón) entre los bloques de techo y muro (Pacheco-Martínez et al., 2013). En cambio cuando las fisuras o grietas presentan esfuerzos predominantemente de tensión, provocando principalmente desplazamientos horizontales (Hernández-Marín et al., 2014), por lo que se deduce que solo tienen desplazamiento perpendicular a su traza.

Para el tipo de fallas con desplazamientos verticales existen las normales y las inversas. En las fallas normales, el bloque de techo desciende con respecto al bloque de muro, y en la falla inversa el bloque de techo asciende con respecto al bloque de muro (Tarbuck y Lutgens, 2005), como se observa en la figura 8.



Figura 8. Identificación de los bloques de techo y muro, tomando como referencia el buzamiento de la falla y el tipo de falla según su desplazamiento vertical.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

En el estado de Aguascalientes, la presencia de un par de discontinuidades geológicas con un rumbo aproximado N-S, limitan el graben de Aguascalientes. Estas dos discontinuidades geológicas son conocidas como la Falla Oriente y la Falla Poniente, donde la Falla Oriente afecta al sector urbano oriental de la ciudad de Aguascalientes.

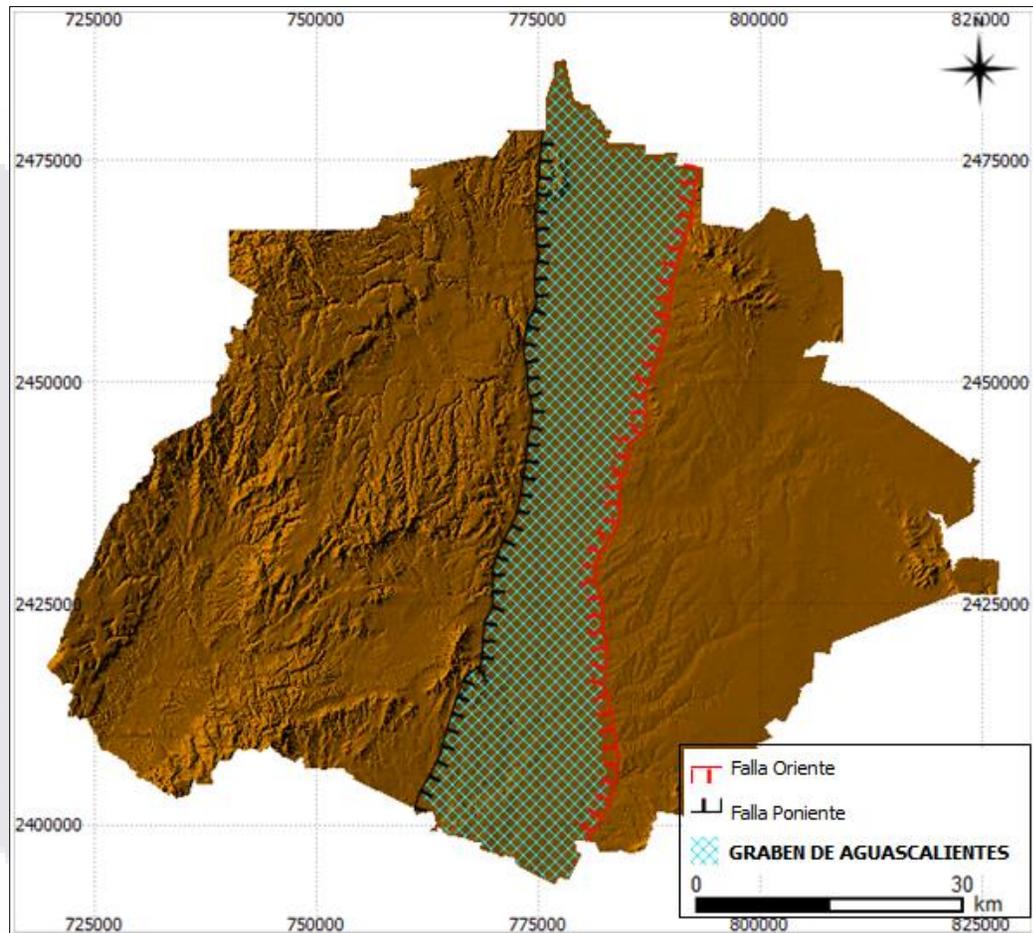


Figura 9. Graben de Aguascalientes delimitado por las fallas normales Oriente y Poniente. Elaborado a partir de cartografía del INEGI (s/f-c).

1.1.1. Subsistencia

La presencia de subsidencia en terrenos y las fallas asociadas a la sobreexplotación del agua subterránea es una problemática que se ha presentado alrededor del mundo en muchas cuencas áridas o semiáridas que dependen en gran medida de los recursos de aguas subterráneas (Pacheco-Martínez et al., 2013). Normalmente los valles conformados por rellenos fluviales y lacustres, donde el acuífero es principalmente granular, poco consolidado y geológicamente reciente, se suele presentar subsidencia,

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

generada en la mayoría de los casos por la extracción excesiva del recurso hídrico subterráneo (Pacheco-Martínez et al., 2012).

En muchos casos de México, el problema de subsidencia está acompañado por fallamiento, problema que actualmente ocurre en varias ciudades ubicadas en un graben tectónico, por ejemplo Aguascalientes (en el graben Aguascalientes que contempla la ciudad capital hasta el municipio de Cosío), San Luis Potosí (ciudad capital, Villa de Reyes y Villa Arista en la zona rural), Morelia, Celaya, Irapuato, Salamanca, Abasolo, Silao, Juventino Rosas y otras del estado de Guanajuato, Querétaro, Tepic, y algunos lugares del Estado de Durango (Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes, 2010).

1.3. Prospección geofísica

La prospección geofísica aplicada para obtener información detallada del subsuelo es cada vez más común. Este tipo de prácticas aplica técnicas matemáticas y físicas para el estudio del subsuelo, búsqueda y análisis de yacimientos presentes; y muchas de las veces sin hacer perturbaciones del sitio de estudio.

1.3.1. Resistividad eléctrica

La prospección geofísica eléctrica para este estudio es activa ya que la resistencia eléctrica es respuesta a una inyección de corriente. Este método es utilizado en minería, geología e hidrogeología, permitiendo, dependiendo de los objetivos de cada estudio, analizar la resistividad de las unidades del subsuelo, identificar ausencia o presencia de yacimientos mineralizados o de agua subterránea, estimar el grado de fracturación de las rocas (TGT- www.geofisica.cl, s/f), así como la estratigrafía basal de las zonas de estudio.

1.3.2. Refracción sísmica

Es otro método de prospección geofísica, en el cual, a través de una fuente generadora de ondas sísmicas, se permite la propagación de las ondas P que son refractadas en límite de los estratos y posteriormente detectadas por los geófonos en la superficie. Este método se basa principalmente en las variaciones en las velocidades de las ondas sísmicas, y cuenta con una gran precisión para determinar los espesores y

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

formas de los estratos, permitiendo entre otras cosas establecer la configuración del lecho rocoso en una cuenca sedimentaria (Pacheco-Martínez, 2007).

1.4. Generalidades

En Aguascalientes las características climáticas y geológicas limitan el desarrollo de los ríos, arroyos, lagos, y otros cuerpos superficiales de agua, por lo que el valle se encuentra sin corrientes fluviales de gran caudal, resultando en que la mayoría de las corrientes son intermitentes, es decir, que solo conducen agua en presencia de precipitaciones pluviales (Gobierno del Estado de Aguascalientes 2010-2016, 2010).

El incremento en la demanda del agua subterránea es una problemática muy seria que el Estado de Aguascalientes enfrenta debido a la creciente escasez del vital líquido. A pesar del decreto de veda publicado en el año de 1963, que lleva por título: “*Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende todo el estado de Aguascalientes*” (Diario Oficial de la Federación, 1963), se han presentado algunas secuelas debido a la intensa sobreexplotación de los acuíferos, como lo son el incremento de los gastos de extracción y la degradación del suelo, y la aparición discontinuidades geológicas que afectan la infraestructura urbana (Gobierno del Estado de Aguascalientes 2010-2016, 2010).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) determina la circunscripción territorial que permita mejorar la administración de las aguas nacionales e incorporar nuevos municipios a través de 13 organismos de cuenca, también llamadas Regiones Hidrológico-Administrativas (RHA). Aunado a esto el Estado de Aguascalientes se encuentra dentro de la RHA-VIII, llamada Lerma-Santiago-Pacífico (Sistema Nacional de Información del Agua, 2012b).

Aunado a lo antes mencionado, el país cuenta con 37 Regiones Hidrológicas (RH) o también llamadas Cuencas Hidrológicas, las cuales conforman a las 13 RHA's (Sistema Nacional de Información del Agua, 2012a). Cada una de estas RH son el área delimitada por un parteaguas que contempla 2 o más desagregaciones que desembocan a un cauce principal. Entonces la división de Aguas superficiales se

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

compone de tres niveles de desagregación y llevan una clave de cada una (Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, 2010). Esto se puede entender en la tabla 3:

Tabla 3 Niveles de desagregación de las Regiones Hidrológicas.

| Nivel | Nombre | Sufijo | Clave | Ejemplo |
|--------------|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|----------------|
| 1 | Región Hidrológica | RH“clave1” | 0 – 37 | RH12 |
| 2 | Cuenca Hidrológica | RH“clave1” “clave2” | A – Z (Mayúsculas) | RH12K |
| 3 | Subcuenca Hidrológica | RH“clave1” “clave2” “clave3” | a – z (Minúsculas) | RH12Kf |

Los aspectos fisiográficos de una región implican identificar los principales rasgos de relieve, procesos que intervinieron en el modelado de la región y que le han dado su aspecto actual. En México, se cuenta con rasgos de relieve muy variados, como lo son cadenas montañosas, valles, altiplanicies, etcétera.

Las provincias fisiográficas son regiones que consideran las siguientes características:

- El relieve es el resultado de la acción de un mismo conjunto de agentes modeladores del terreno,
- Mismo origen geológico
- Semejanza en tipo de suelo
- Semejanza en vegetación que sustenta.

El estado de Aguascalientes comprende parte de varias provincias fisiográficas: al poniente la provincia Sierra Occidental, al oriente por la Mesa del Centro y al sur con muy poca superficie pertenece al Eje Neovolcánico. En las siguientes figuras se muestran las provincias, subprovincias y las topoformas o relieves que caracterizan al Estado de Aguascalientes.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

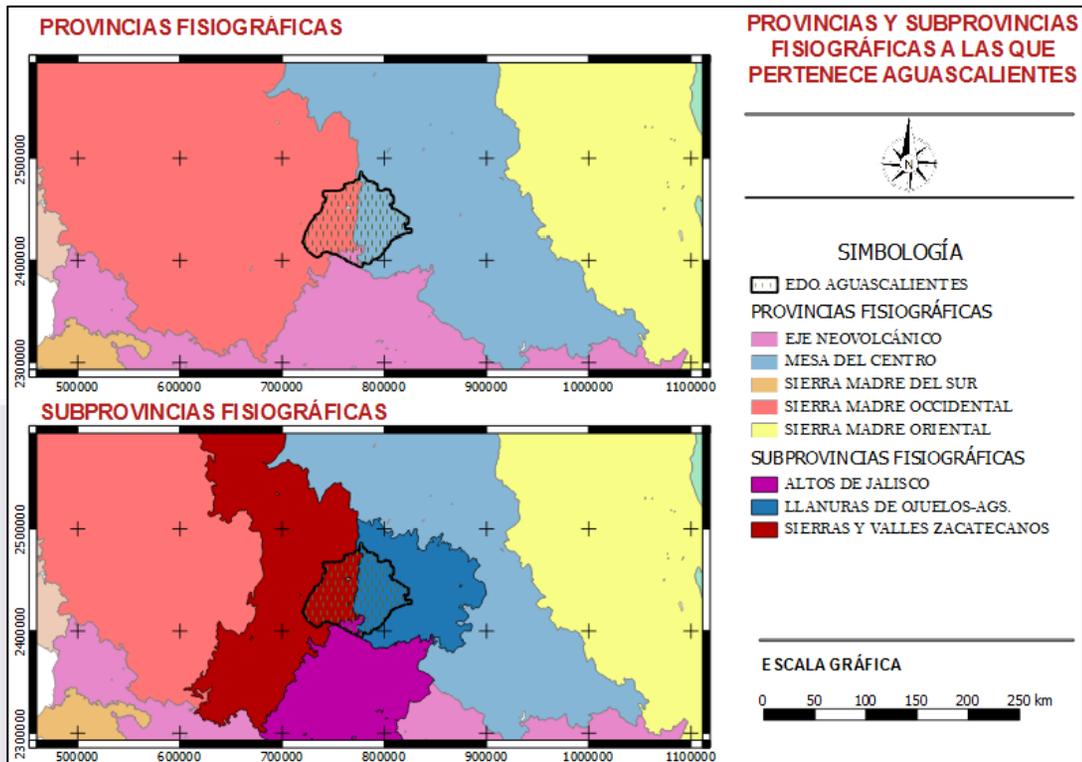


Figura 10. Provincias y subprovincias fisiográficas en el Estado de Aguascalientes. Basado en la información del INEGI (s/f-a).

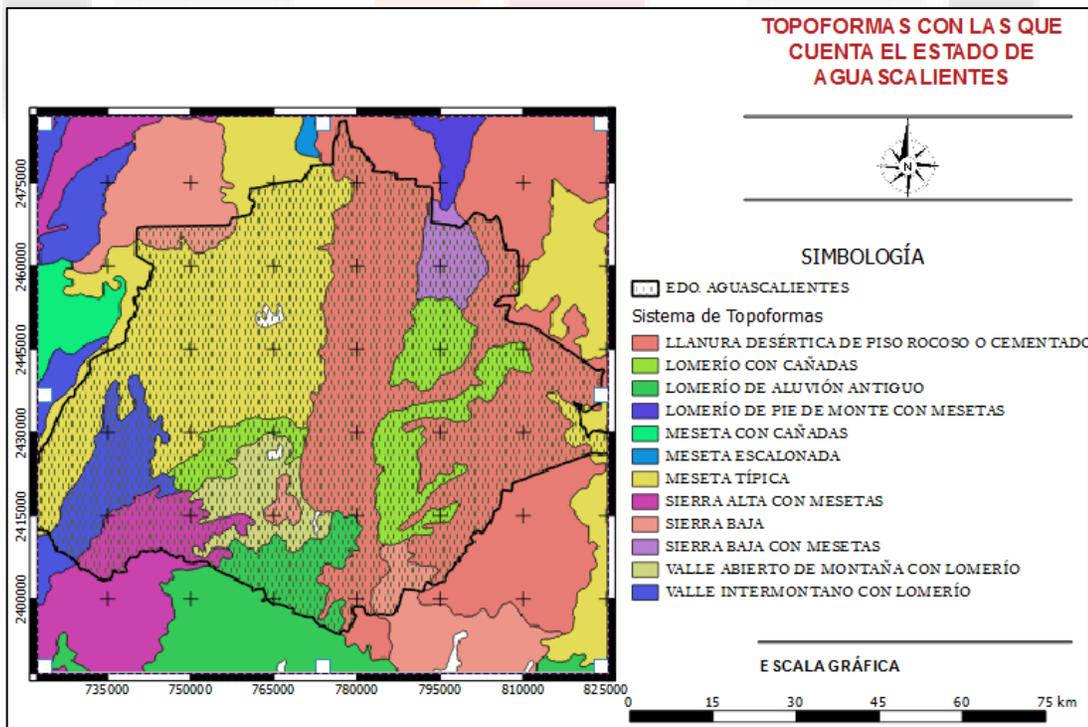


Figura 11. Topoformas o relieves que caracterizan al Estado de Aguascalientes. Basado en la información del INEGI (s/f-a).

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Aguascalientes contiene diversas unidades de rocas que afloran. Al poniente del estado predomina la ígnea extrusiva ácida; mientras que al sur y al oeste predomina la arenisca conglomerado; y, presentándose en el valle un suelo que en su mayoría está delimitado por dos fracturas (INEGI, s/f-c). Esto puede visualizarse en la figura 12.

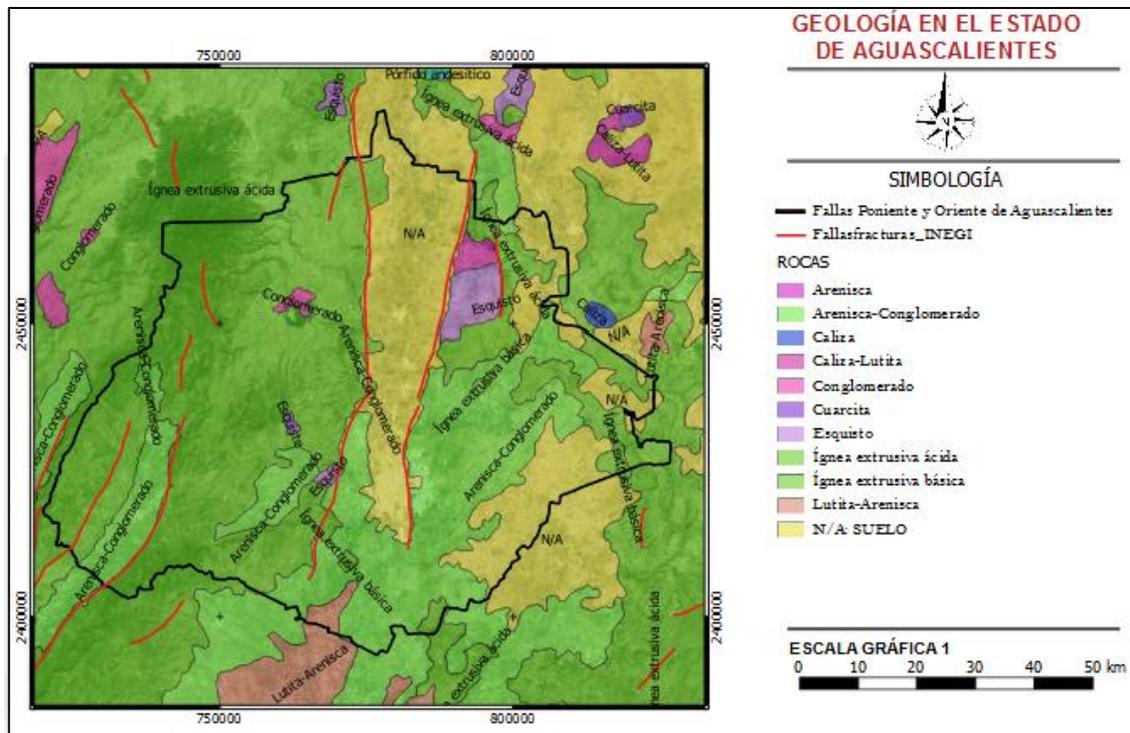


Figura 12. Geología característica en el Estado de Aguascalientes. Basado en la información del INEGI (s/f-c).

En cuanto al clima, el estado presenta un clima semiseco en la mayoría de su cobertura, siendo aproximadamente el 86.30% y el resto con clima templado, ver figura 13. Mientras que su temperatura media anual está alrededor de 17.4°C y su precipitación media anual de 526mm (Gobierno del Estado de Aguascalientes 2010-2016, 2010).

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

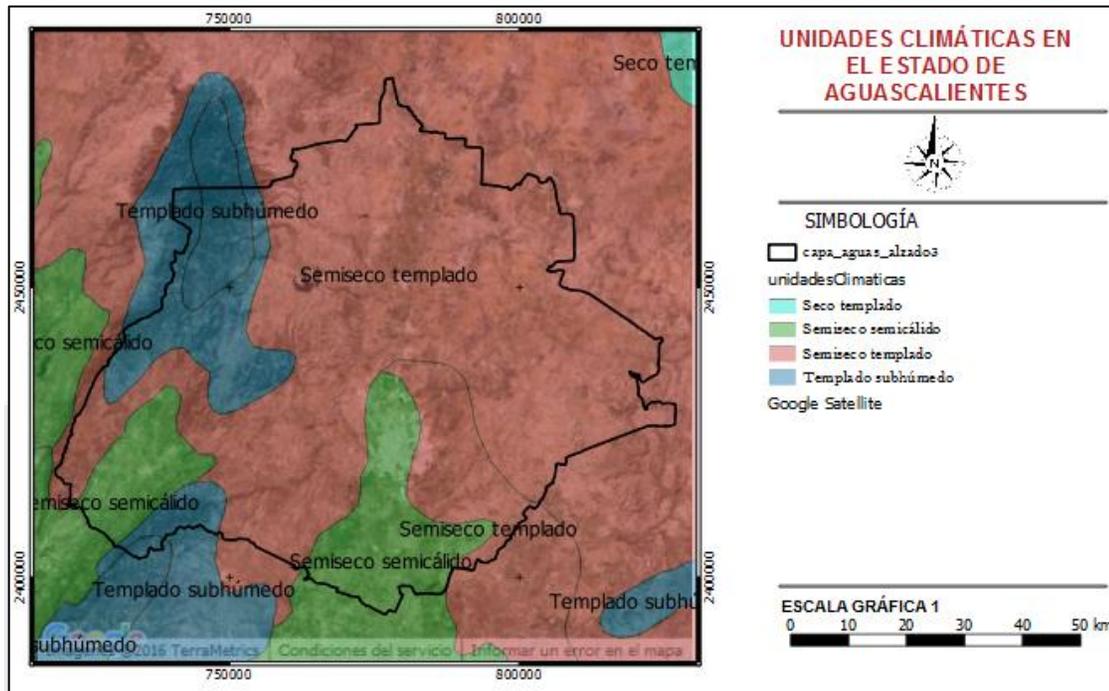


Figura 13. Unidades climáticas en Aguascalientes. Basado en la información del INEGI (s/f-a).

La precipitación es una parte fundamental del ciclo hidrológico y el promedio de ella es variable en la superficie terrestre debido a muchos factores como pueden ser: la latitud, la altitud y continentalidad (Campos-Aranda, 1984). Así mismo, la precipitación es de suma importancia para conocer la viabilidad de los proyectos de aprovechamiento y así como valorar los riesgos para proyectos de control (Martínez-Martínez, 2011a). En Aguascalientes existe una red de estaciones climatológicas administradas por la CONAGUA a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), y en las cuales se registran mediciones de varios parámetros hidroclimatológicos, como lo son precipitación y temperatura. En la figura 14 se pueden visualizar las estaciones en operación en el Estado de Aguascalientes:

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

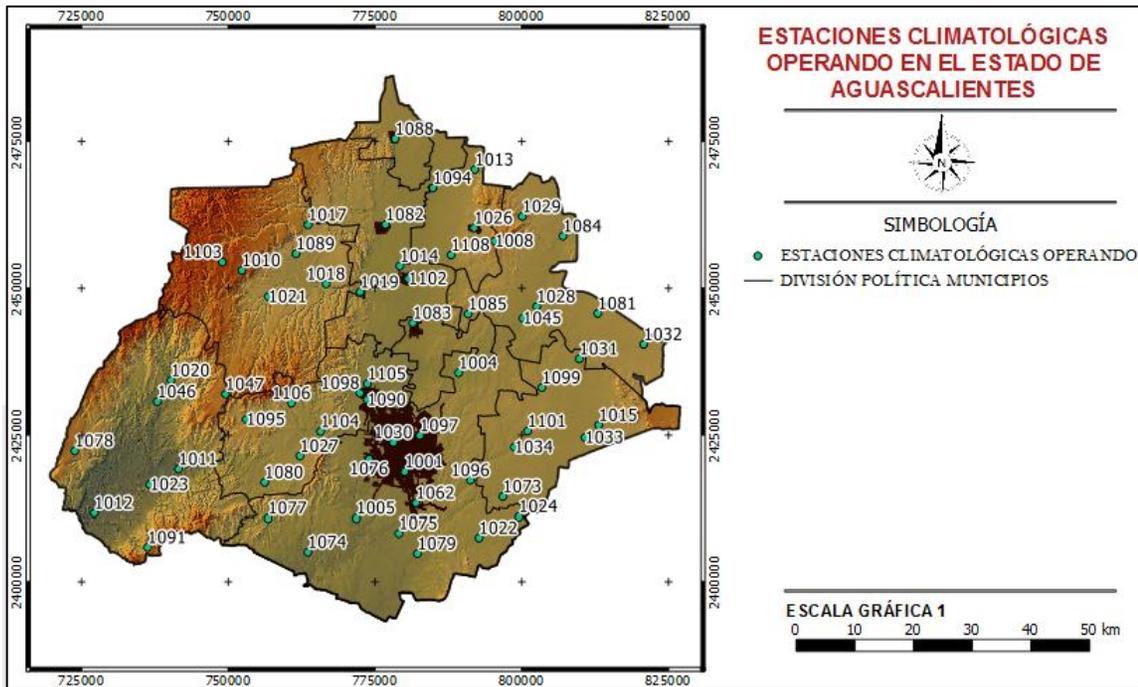


Figura 14. Estaciones climatológicas en operación en el Estado de Aguascalientes. Elaborado a partir de la información del Servicio Meteorológico Nacional (2010).



CAPÍTULO II

CAPÍTULO II

2. METODOLOGÍA

2.1. Selección de la zona de estudio

La zona de estudio se propuso a partir de los siguientes dos criterios:

- En ella se presentaron discontinuidades geológicas activas, con desplazamientos verticales, horizontales u oblicuos.
- Se consideró que existiera una separación horizontal entre bloques que permitiera el vertido intencional de agua.
- que se tuviera fácil acceso, para la realización de las pruebas necesarias.
- Que no tuviera árboles o arbustos grandes ya que sus raíces podrían aumentar la permeabilidad del medio, ya que principalmente se buscaba conocer la capacidad de infiltración debido exclusivamente al efecto de la dinámica de la falla.

2.2. Hidrología superficial para estimación del volumen de escurrimiento

Con el fin de conocer la longitud de la discontinuidad geológica necesaria para el volumen que puede ser infiltrado a través ésta, se procedió a desarrollar un estudio hidrológico para conocer el volumen de escurrimiento de la cuenca de estudio (CE) que se proporciona al punto de la falla. El manejo de software de Sistema de Información Geográfica (SIG) libres y de código abierto, como los programas: QGIS, GRASS y SAGA, permitió determinar la delimitación de la cuenca hidrográfica, elementos topográficos y otros rasgos geomorfológicos.

2.2.1. Geomorfología de la cuenca

La geomorfología estudia rasgos de la superficie terrestre de manera cuantitativa (Campos-Aranda, 1984). En la CE se determinaron algunos rasgos geomorfológicos que pueden influir en las características de los escurrimientos a un corto o largo plazo (Martínez-Martínez, 2011a). Estas características geomorfológicas se calcularon a partir de lo establecido por Campos Aranda (1984) y Martínez Martínez (2011) y los resultados se muestran en el siguiente capítulo.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

2.2.1.1. Localización de la cuenca hidrográfica de estudio (CE).

La zona de estudio se ubica en un punto en donde el cauce se ve afectado por la falla oriente, el cual fue el punto de referencia para poder determinar la CE y su red de drenaje. Esto último se hizo a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) y procesado con el programa computacional de Sistema de Información Geográfica (SIG) QGIS-GRASS.

2.2.1.2. Área o magnitud de la cuenca

El área es la superficie plana proyectada horizontalmente y está delimitada por su parteaguas (Campos-Aranda, 1984). El tamaño de la cuenca es importante ya que existen variaciones al comportamiento hidrológico, es por ello que se clasificó su cuenca a partir de su superficie. Esta clasificación según el tamaño se basa de tabla 4:

Tabla 4. Clasificación convencional de las cuencas según su tamaño. Basada en el trabajo de Campos-Aranda (1984).

| ÁREA (km²) | DENOMINACIÓN |
|-------------------------------|---------------------|
| < 25 | Muy pequeña |
| 25 a 250 | Pequeña |
| 250 a 500 | Intermedia-pequeña |
| 500 a 2500 | Intermedia-grande |
| 2500 a 5000 | Grande |
| > 5000 | Muy grande |

2.2.1.3. Forma de la cuenca

La forma de una cuenca influye en las características de la descarga de sus corrientes es decir, los escurrimientos en una cuenca circular se comportan de manera diferente a una cuenca con una forma alargada (Campos-Aranda, 1984). Es por ello que se calculó el coeficiente de compacidad, que compara el perímetro de la cuenca con el de un círculo, y la relación de elongación, que hace una relación ente el diámetro de un círculo con la longitud de la cuenca.

2.2.1.3.1. Coeficiente de compacidad (Cc).

Como se mencionó anteriormente el coeficiente de compacidad se calculó a partir de la relación del perímetro de la CE y el perímetro de una circunferencia, es decir, es una medida de la redondez de la cuenca (Martínez-Martínez, 2011a). Cuando el resultado

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

de la unidad refiere a que la cuenca es circular y conforme su valor incrementa tendrá una forma asimétrica. La ecuación siguiente fue la empleada para determinar el C_c .

$$C_c = P/P_c = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

En donde:

C_c : Coeficiente de compacidad

P : Perímetro de la cuenca

P_c : Perímetro de la circunferencia, que equivale a $P_c = 0.282/\sqrt{A}$

A : Área de la cuenca

2.2.1.3.2. Relación de elongación (Re)

Esta relación de elongación se calculó con el fin de estimar el relieve de la cuenca, ya que con la relación que existe entre el diámetro de un círculo y la longitud de la cuenca se pueden asociar el tipo de relieve. El valor de Re varía en el rango de 0.6 a 1.00 y mientras más se acerque a la unidad es característico de relieves bajos y en los rangos de 0.6 a 0.8 es característico de fuertes relieves y pendientes pronunciadas (Campos-Aranda, 1984). La ecuación que se empleó fue la siguiente:

$$Re = D/L_c = 1.1284 \frac{\sqrt{A}}{L_c}$$

En donde:

Re : Relación de elongación

D : Diámetro de un círculo que es igual a $D = 1.1284 * \sqrt{A}$

A : Área de la cuenca.

L_c : Longitud de la cuenca

2.2.1.4. Curva hipsométrica

La curva hipsométrica se calculó porque es un referente esencial para conocer el relieve de una cuenca y a que la respuesta del escurrimiento puede estar mayormente influenciado por la topografía que por su forma (Campos-Aranda, 1984). La curva hipsométrica es un gráfico que se hace a partir de elevaciones y el área entre ellas (área entre curva y curva de nivel). Una característica también importante es que nos permite conocer la elevación media de la cuenca, al igual que el tipo geológico de la cuenca.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Se estableció el tipo geológico de la cuenca a partir de tres curvas hipsométricas típicas; donde la curva A corresponde a una cuenca geológicamente nueva (meseta); la curva B para una cuenca geológicamente madura (pie de montaña); y la curva C para una cuenca geológicamente erosionada (valle) (Martínez-Martínez, 2011a). En el gráfico siguiente se muestran los tres tipos de curvas hipsométricas típicas:

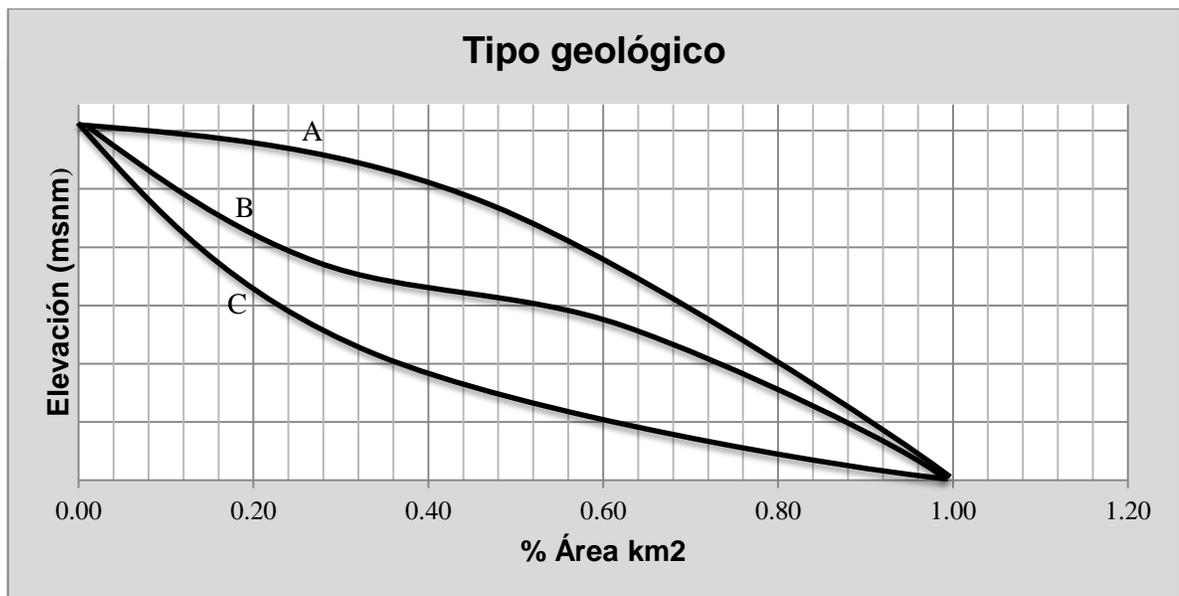


Figura 15. Curvas hipsométricas características del tipo geológico de cuencas.

2.2.1.5. Elevación media de la cuenca

La elevación media de la cuenca es básicamente un promedio de las elevaciones del terreno de la cuenca. Este parámetro puede ser de ayuda para estimar características de temperatura y la precipitación en la cuenca (Martínez-Martínez, 2011a).

La elevación media de la cuenca se calculó por el Tercer Criterio (Martínez-Martínez, 2011a), el cual se basa en el área bajo la curva hipsométrica, mediante la ecuación siguiente:

$$\bar{El} = \frac{\int_0^A El dA}{A}$$

En donde:

\bar{El} : Elevación media de la cuenca

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

El : Elevación media entre 2 elevaciones (curvas de nivel), $El = (El_1 + El_2)/2$

dA : Superficie que existe entre 2 elevaciones (curvas de nivel).

A : Superficie total de la cuenca.

2.2.1.6. Pendiente media de la cuenca

La pendiente media de la cuenca es el promedio total de las pendientes en la superficie de la cuenca. Este valor tiene relación con el escurrimiento superficial, la infiltración, etcétera. (Martínez-Martínez, 2011a). Para este trabajo, la pendiente media de la cuenca se calculó por el Criterio Alvord, el cual se basa en el área de la superficie de la cuenca, el desnivel constante entre curvas de nivel y las longitudes de estas curvas en la cuenca. La ecuación que describe lo anterior es:

$$Sc = \frac{D}{A}(l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n)$$

En donde:

Sc : Pendiente media de la cuenca

D : Desnivel constante entre curvas de nivel

A : Superficie total de la cuenca

l_i : Longitud de la curva de nivel n

2.2.1.7. Red de drenaje

La red de drenaje de una cuenca es el conjunto de cauces sobre los que escurre el agua de forma permanente o temporal. Estos cauces pueden clasificarse según el tiempo en el que circula el agua en ellos; los perenes llevan agua de manera permanente, salvo en sequías extremas; los intermitentes llevan agua la mayoría del tiempo, atenuándose su conducción de agua cuando se presentan lluvias; y los efímeros que solo llevan agua cuando llueve o inmediatamente después de éstas (Campos-Aranda, 1984). El orden de las corrientes es un valor numérico que muestra el grado de ramificación o bifurcación en una cuenca, y se enumeran de manera ascendente, a partir de las corrientes que no cuentan con bifurcación hasta llegar al cauce principal.

Así mismo se determinó la frecuencia de la corriente o densidad de corriente para conocer la cantidad de segmentos de corrientes por unidad de área (Martínez-

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Martínez, 2011a). La ecuación siguiente es con la que se determinó la frecuencia de las corrientes:

$$F = \frac{\sum N_u}{A}$$

En donde:

F: Frecuencia de corrientes

N_u : Cantidad de segmentos de orden u

A: Superficie total de la cuenca

2.2.2. Condiciones naturales de la cuenca

2.2.2.1. Hidrografía.

A partir de la delimitación de la CE, se identificó a que cuenca y subcuenca hidrológica pertenece, según los niveles de desagregación de las RH

2.2.2.2. Fisiografía

Para la CE se identificó a qué Provincia y Subprovincia fisiográfica pertenece, de igual forma se identificó el relieve o topoforma que lo caracteriza.

2.2.2.3. Geología

Se identificaron algunas características referentes a los ambientes geológicos, como lo son las fallas que delimitan valle de Aguascalientes y los tipos de rocas que se encuentran en la CE.

2.2.2.4. Climatología

En el Estado de Aguascalientes predomina un clima semiseco. Debido a que la precipitación varía de un punto a otro, aunque estos sean cercanos, se identificó cuales estaciones climatológicas tienen influencia en la CE, y así poder estimar la precipitación media de la cuenca a partir del método de los polígonos de Thiessen, ya que éste método toma en cuenta las estaciones más cercanas a la cuenca, dentro y fuera de ella (Martínez-Martínez, 2011a).

La precipitación media por polígonos de Thiessen se calcula a partir de la ecuación:

$$\bar{p} = \frac{1}{A} \sum_1^n p_i A_i$$

En donde:

\bar{p} : Precipitación media de la cuenca

A: Área de cuenca

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

p_i : Precipitación media acumulada del área de influencia i

A_i : Área de influencia en la cuenca de cada estación climatológica.

Los datos faltantes en un registro son frecuentes y pueden deberse a una variedad de causas (Campos-Aranda, 1984). Es por eso que se determinaron los datos faltantes de los registros de las estaciones que influyen en la CE, para lograr estimar la precipitación media de la cuenca. Los métodos para deducir los datos faltantes fueron el Método racional deductivo y el Método del US National Weather Service. Para éste estudio se consideraron primeramente los resultados obtenidos del Método US National Weather Service, puesto que éste ha sido verificado tanto teórica como empíricamente (Campos-Aranda, 1984); y si no fue posible obtener un dato faltante debido las restricciones del método, se consideró tomar el resultado del Método Racional deductivo, el cual que se rige de igual manera con ciertas restricciones. En la tabla 5 se identifican las características y restricciones de éstos métodos.

Tabla 5. Métodos utilizados para estimar datos faltantes. Basado partir de las metodologías de la Deducción de datos faltantes (Martínez-Martínez, 2011a)

| | Método del US National Weather Service | Método Racional Deductivo | |
|------------------------------------|--|---|---|
| Tipo de estimación | Diaria, mensual o anual | Mensual | |
| Cantidad de datos faltantes | n cantidad | 1 | máximo 2 |
| Manera de estimar | Se estima en base a los datos en las estaciones circundantes y sus respectivas distancias a la estación con faltantes. | Promedio aritmético de los valores contenidos en el registro de la misma estación para ese mes. | |
| Restricción | ≥ 2 estaciones circundantes (más cercanas) con datos. | ≥ 10 datos para el promedio aritmético | ≥ 20 datos para el promedio aritmético |
| Ecuación | $p_x = \frac{\sum \frac{p_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}}$ | $p_x = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n}$ | |

Para la estación climatológica Aguascalientes II, se estimó la precipitación para todos sus datos faltantes mediante el Método del US National Weather Service; mientras que, para la estación Cañada Honda sólo se pudo estimar la precipitación faltante del año 2013 con éste método, ya que en las estaciones circundantes no se cuenta con registros necesarios para los periodos con datos faltantes.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

2.2.3. Volumen de escurrimiento medio anual.

Para cuencas no aforadas, la estimación del volumen de escurrimiento usualmente es estimado para conocer las dimensiones de los proyectos de almacenamiento (Martínez-Martínez, 2011b). En este documento, el estudio del volumen de los escurrimientos tiene como objetivo estimar el volumen que puede ser infiltrado en una discontinuidad geológica.

Ya que la CE no tiene algún tipo de aforo, se procedió a calcular los escurrimientos anuales por el Método del coeficiente de escurrimiento anual; y posteriormente los escurrimientos mensuales con el Método relación lluvia- escurrimiento, para conocer, de manera muy general, las dimensiones requeridas de un embalse que regule los escurrimientos superficiales de la cuenca de estudio. Para ambos métodos, la estimación requiere información climatológica que influye en la cuenca, en este caso fueron las precipitaciones medias mensuales.

Básicamente la metodología para la estimación se basó en:

1. Estaciones climatológicas que influyen en la cuenca

Se identificaron las estaciones climatológicas que influyen en la cuenca por polígonos de Thiessen, y con ello poder ponderar su influencia de cada estación. Este mismo método se utilizó para conocer la precipitación media de la cuenca en el subcapítulo *Condiciones naturales de la cuenca-Climatología*.

2. Estimación de datos faltantes

Se estimaron los datos faltantes en los años de operación para cada estación climatológica. Así mismo, se estimaron los registros de datos faltantes para la estación climatológica con menos años de operación, es decir, se igualaron los años de registros de las estaciones, de modo de utilizar el mismo período de operación. La estimación se hizo a partir de los métodos Racional Deductivo y el del US National Weather Service, cumpliendo las restricciones de la tabla 5.

3. Precipitación media de la cuenca

Se procedió a calcular la precipitación media para cada registro mensual, a partir de la información de las estaciones climatológicas y sus respectivas áreas de

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

influencia. Esto se logró a partir del Método de Polígonos de Thiessen con la siguiente ecuación:

$$\bar{p} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n p_i A_i = \sum_{i=1}^n (A_i/A) * p_i$$

En donde:

\bar{p} : Precipitación media de la cuenca para cada mes

A : Área de cuenca

p_i : Precipitación media acumulada del área de influencia i

A_i : Área de influencia en la cuenca de cada estación climatológica

n : Número de estaciones climatológicas que influyen en la cuenca de estudio.

Finalmente, para conocer la precipitación acumulada de cada año se sumó la precipitación media de la cuenca de cada mes, obteniéndose a partir de la siguiente ecuación:

$$P_i = \sum_{i=1}^n \bar{p}_i$$

En donde:

P_i : Precipitación acumulada para cada año

\bar{p} : Precipitación media de la cuenca para cada mes

n : Número de meses.

4. Método del coeficiente de escurrimiento anual. Coeficiente de escurrimiento

El Método del coeficiente de escurrimiento anual permite obtener la lámina de escurrimiento para cada año y supone que el escurrimiento es proporcional a la precipitación (Martínez-Martínez, 2011b). Para determinar ésta lámina se contempla la precipitación acumulada y el valor del coeficiente de escurrimiento (C) para cada año. Donde éste coeficiente C se basa en las combinaciones de suelo-cobertura para obtener un parámetro K y la precipitación acumulada para cada año. El cálculo se realizó de la siguiente manera:

4.1. Coberturas y usos de suelo en la cuenca

Lo primero fue identificar en la cuenca de estudio, las coberturas y usos de suelo, y determinar sus respectivas áreas que ocupan en la cuenca.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

4.2. Determinación del parámetro *K*

Que depende de sus coberturas y del tipo de suelo según su clasificación, donde la información del tipo de suelo fue obtenida del INEGI (2013), siendo A: finos, B: medios y C: Gruesos. De la tabla 6 se obtiene el valor de *K*.

Tabla 6. Parámetro *k* para Método del coeficiente de escurrimiento anual. Basado del trabajo de Martínez-Martínez (2011b).

| CUBIERTA (O USO DEL SUELO) | TIPO DE SUELO | | |
|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| | A | B | C |
| Barbecho, áreas incultas y desnudas | 0.26 | 0.28 | 0.3 |
| Cultivos: | | | |
| En hilera | 0.24 | 0.27 | 0.3 |
| Legumbres o rotación de pradera | 0.24 | 0.27 | 0.3 |
| Granos pequeños | 0.24 | 0.27 | 0.3 |
| Pastizal: | | | |
| % del suelo cubierto y pastoreo | | | |
| Más de 75% - poco | 0.14 | 0.2 | 0.28 |
| De 50 a 75% - regular | 0.2 | 0.24 | 0.3 |
| Menos de 50% - excesivo | 0.24 | 0.28 | 0.3 |
| Bosque: | | | |
| Cubierto más de 75% | 0.07 | 0.16 | 0.24 |
| Cubierto de 50 a 75% | 0.12 | 0.22 | 0.26 |
| Cubierto de 25 a 50% | 0.17 | 0.26 | 0.28 |
| Cubierto menos de 25% | 0.22 | 0.28 | 0.3 |
| Cascos y zonas con edificaciones | 0.26 | 0.29 | 0.32 |
| Caminos, incluyendo derecho de vía | 0.27 | 0.3 | 0.33 |
| Pradera permanente | 0.18 | 0.24 | 0.3 |
| Suelos: | Grupo A: | Grupo B: | Grupo C: |
| | Bajo potencial de escurrimiento | Moderadas velocidades de infiltración | Bajas velocidades de infiltración |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

4.3. Coeficiente de escurrimiento (C)

Se estimó el coeficiente de escurrimiento para cada año, el cálculo se efectuó con la ecuación siguiente:

$$C_i = \begin{cases} k \frac{P_i - 250}{2000} & ; \text{si } k \leq 0.15 \\ k \frac{P_i - 250}{2000} + \frac{k - 0.15}{1.5} & ; \text{si } k > 0.15 \end{cases}$$

En donde:

C_i : Coeficiente de escurrimiento para cada año

k : Parámetro que depende del tipo de suelo según su clasificación y sus coberturas.

P_i : Precipitación acumulada para cada año

5. Método del coeficiente de escurrimiento anual. Lámina de escurrimiento anual

La lámina de escurrimiento se calculó para cada año y se aplicó la siguiente ecuación:

$$E'_i = C_i * P_i$$

En donde:

E'_i : Lámina de escurrimiento para cada año

C_i : Coeficiente de escurrimiento para cada año

P_i : Precipitación acumulada para cada año

6. Método del coeficiente de escurrimiento anual. Volumen de escurrimiento anual

Finalmente se estimó el volumen de escurrimiento para cada año y el medio anual, considerando la superficie de la cuenca. La ecuación que se utilizó para estimar el volumen de escurrimiento anual es la siguiente:

$$Ve_i = E'_i * A$$

En donde:

Ve_i : Volumen de escurrimiento de cada año

E'_i : Lámina de escurrimiento de cada año

A : Área de la cuenca

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

El escurrimiento medio anual de la cuenca de estudio, que es el que sirvió para determinar los volúmenes de infiltración a través de la Falla oriente, así como para dimensionar el embalse que regule los escurrimientos, se estimó con la siguiente ecuación:

$$\overline{Ve} = \frac{\sum_{i=1}^n Ve_i}{n}$$

En donde:

\overline{Ve} : Volumen de escurrimiento medio anual en la cuenca

Ve_i : Volumen de escurrimiento del año i

n : Número de años

7. Método relación lluvia-escurrimiento. Meses que producen escurrimiento

Para estimar los meses que generan escurrimiento y en qué porcentaje, se aplicó el Método relación lluvia–escurrimiento. Para las precipitaciones medias para cada registro se contempló la consideración de éste método, que se menciona textualmente a partir de la literatura de Martínez-Martínez (2011b): “*se supone que en los meses que llueve es posible que se genere escurrimiento, siempre y cuando la precipitación del mes respectivo supere cierta precipitación; sea la precipitación media mensual de ese año o la precipitación mensual que ya no produce escurrimiento*”; para éste caso se consideró la precipitación media mensual.

Entonces, las precipitaciones medias de cada mes que superaron la media mensual del respectivo año, se consideraron como las que generaban escurrimiento; y a partir de esto se pondero cada una de ellas respecto a su media mensual. Estas ponderaciones son las que sirvieron de referencia para calcular el volumen de escurrimiento de cada mes, que son proporcionales al volumen de escurrimiento de su respectivo año.

Con el fin de conocer la distribución del volumen de escurrimiento en los meses de cada año se aplicó la siguiente ecuación:

$$Ve_j = Ve_i * (\% \text{ de escurrimiento mensual})$$

En donde:

Ve_j : Volumen del mes que genera escurrimiento

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

V_{e_i} : Volumen de escurrimiento para cada año

% de escurrimiento mensual: Es el porcentaje de los meses que generan escurrimiento, es decir los meses en los cuales su precipitación supera la media mensual del respectivo año.

2.3. Implementación de métodos geofísicos

Los métodos geofísicos se emplearon para relacionar la configuración de los suelos, al igual que analizar el proceso de infiltración de agua en el medio fracturado; para ello, se vertieron directamente en un punto de la discontinuidad 10,000 litros de agua potable. En este estudio solo se trabajó con el Sondeo eléctrico resistivo y el de Refracción sísmica.

2.3.1. Selección del punto en la Falla Oriente dentro de la zona de estudio

Los estudios de resistividad y de refracción sísmica se realizaron en un punto donde la discontinuidad geológica atraviesa el área de estudio. Ésta discontinuidad cuenta con una separación apreciable entre el techo y muro, y una profundidad considerable sin azolves. Cabe mencionar que el tendido y colocación de los electrodos y geófonos, se realizó de manera perpendicular al trazo de la falla, esto con el fin de visualizar los desplazamientos del agua en los perfiles obtenidos.

2.3.2. Sondeo eléctrico continuo (CVES)

El método del sondeo eléctrico continuo (CVES) fue empleado para conocer cómo varían las resistividades aparentes en el subsuelo, a partir de unos perfiles en bidimensionales (2D) (Molina-Padrón, 2006). Con lo anterior, se pudo inferir el comportamiento de la infiltración a través del medio fracturado; esto alrededor del punto de vaciado de agua potable. Así mismo, el perfil obtenido de las resistividades antes del vaciado del agua fue comparado con el perfil del método de refracción sísmica, con el fin de encontrar alguna relación ante el trazo de la discontinuidad.

Para el desarrollo del sondeo se colocaron electrodos alineados con una distancia interelectródica constante. Donde la serie de electrodos fue de 24, con el fin de obtener una cantidad elevada de configuraciones combinadas (Molina-Padrón, 2006). Se utilizó

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

el arreglo dipolo-dipolo para medidas en 2D dada su capacidad de detectar humedades en discontinuidades saturadas (Gannon et al., 2012).

De acuerdo a lo mostrado en la figura 16, con la configuración del arreglo dipolo-dipolo los electrodos de corriente AB permanecen fijos, mientras que el par de electrodos de potencial MN se desplaza electrodo por electrodo, hasta lograr las configuraciones máximas posibles con todos los electrodos instalados. De ésta manera ya concluidas las primeras configuraciones para AB, se procede a desplazar este par de electrodos de corriente a un siguiente electrodo, quedando AB en los electrodos 2 y 3, respectivamente; y con ello obtener las segundas configuraciones desplazando los electrodos de potencial MN en cada electrodo del tendido. De esta manera se continúa desplazando AB hasta lograr tener todas las configuraciones posibles, esto puede visualizarse en la figura 16.

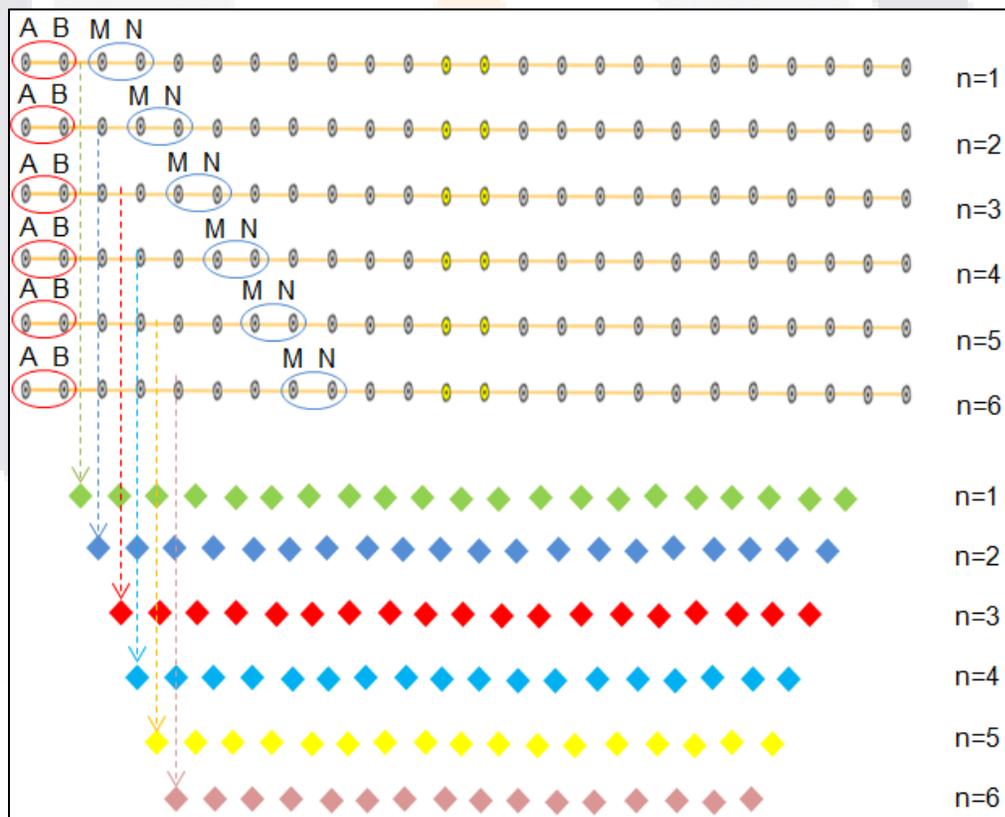


Figura 16. Medidas tomadas a partir del arreglo Dipolo-Dipolo en 2D.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

El equipo que se empleó para obtener las resistividades del subsuelo fue el IRIS – SYSCAL, el cual se encargó de activar o desactivar los electrodos de corriente y de potencial de manera automática, logrando todas las configuraciones posibles del tendido de electrodos y así obtener las resistividades del terreno.

Los valores obtenidos de las resistividades se procesaron a partir de algoritmos de inversión que pueden obtenerse con cualquier software de interpretación bidimensional de tomografía eléctrica a partir de valores de resistividad.

2.3.3. Método sísmico

El método de sísmica fue empleado para conocer la configuración estratigráfica del suelo y poder ser comparado con el método de sondeo eléctrico continuo (CVES). Se aplicó el método sísmico de refracción ya que cuenta con una gran precisión para determinar variaciones estratigráficas y configuración del lecho rocoso (Pacheco-Martínez, 2007).

En el método sísmico de refracción, la fuente generadora de ondas sísmicas fue por golpeo, que fue elaborado de manera manual con un marro al golpear una placa de metal resistente colocado en la superficie del suelo. Las ondas se propagaron a través del medio en diferentes velocidades dependiendo de las características mecánicas de cada material.

En este método las ondas sísmicas se propagan en sentido descendente y a una cierta velocidad. Estas ondas al pasar por dos medios de diferentes características mecánicas se refractan, a partir de esa interfase las ondas ascienden y podrán ser captadas por los geófonos receptores. Este efecto se repite n número de veces dependiendo de la dirección de las ondas y su propagación a través de dos medios distintos (Pacheco-Martínez, 2007), como se observa en la figura 17.

Para la aplicación del método se utilizó un equipo GEOMETRICS de 24 canales, donde los geófonos verticales utilizados fueron de 4.5 Hz, mientras que se utilizó un geófono horizontal-vertical para la vibración ambiental de 1Hz. El procesamiento de los datos obtenidos se hizo con la ayuda del software Rayfract.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

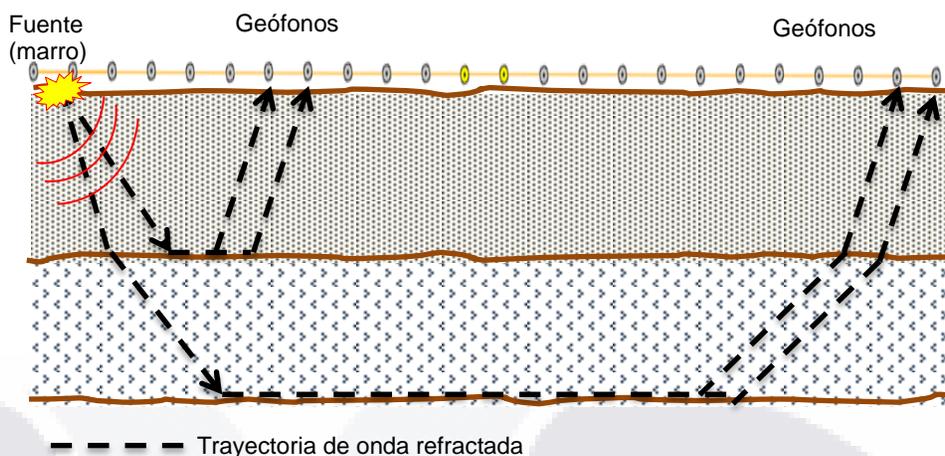


Figura 17. Trayectorias de las ondas de refracción sísmica.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través
de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

CAPÍTULO III

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS

3.1. Selección de la zona de estudio

La zona de estudio se ubica en el Municipio de Aguascalientes al noreste de la zona urbana de la capital. Se encuentra a una distancia aproximada de 5.33 km de la zona centro de la ciudad capital y es atravesada por el Arroyo la Hacienda. Las coordenadas UTM del punto donde se interceptan la Falla Oriente y el Arroyo la Hacienda son: 13 Q 781570, 2426916. La figura 18 muestra la ubicación de la zona de estudio dentro del contexto estatal, además se incluyen las discontinuidades que se pueden observar actualmente en el valle de Aguascalientes.

Las discontinuidades geológicas presentes en el área de estudio cuentan con aberturas horizontales apreciables entre el muro y techo, alrededor de 0.50 m. Cabe mencionar que existen lugares donde se encuentran azolvadas por escombros y también desplazamiento relativo vertical. La figura 19 muestra el detalle de la zona de estudio dentro del contexto de la zona urbana de Aguascalientes. Por su parte las figuras 20 y 21 muestran los trabajos de movimientos de tierras para facilitar el acceso a la zona de estudio.

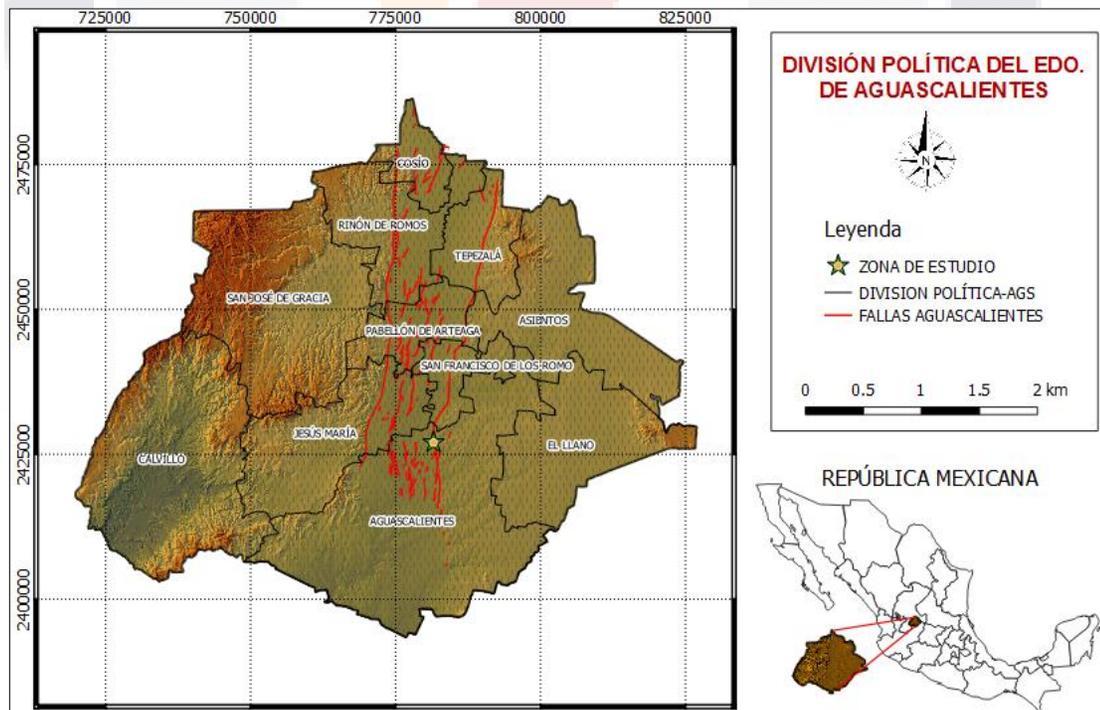


Figura 18. Ubicación de la zona de estudio en el Estado de Aguascalientes.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

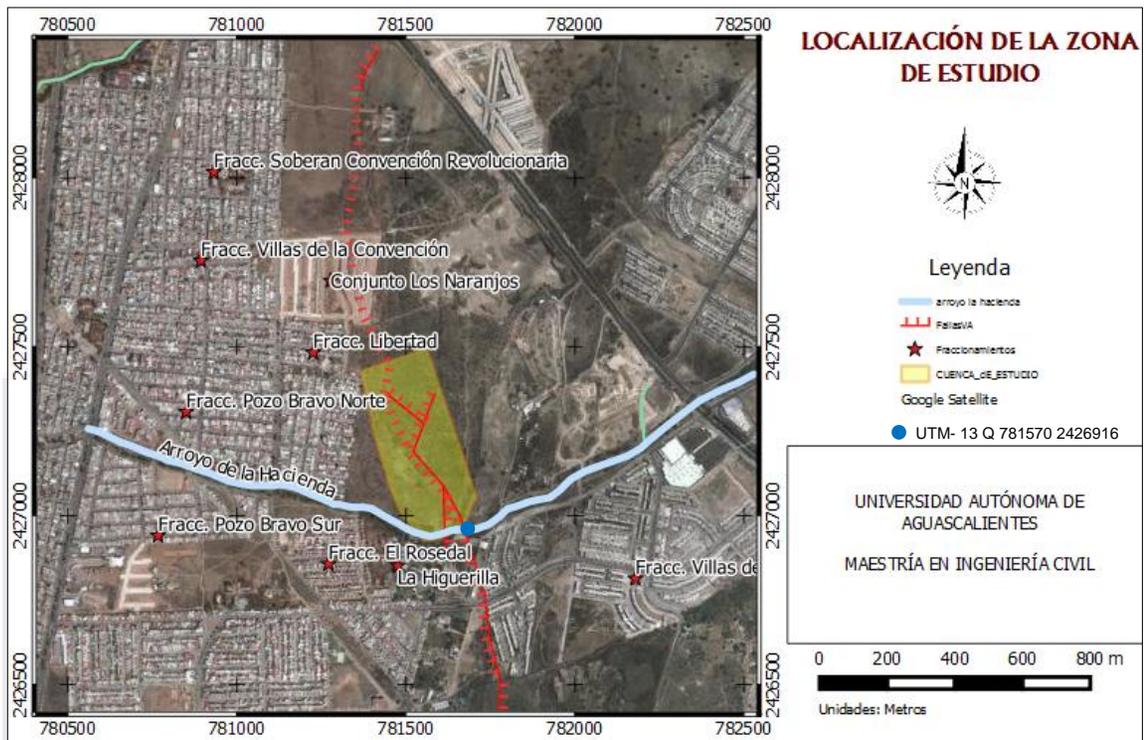


Figura 19. Localización geográfica de la zona de estudio



Figura 20. Movimiento de terracerías, inmediatamente después de cruzar puente, inmediatamente después de cruzar puente, teniendo acceso por la C. Rosa Minutte del Fracc. El Rosedal.



Figura 21. Ligerio despalme de camino hacia la Falla Oriente desde el acceso Arroyo de la Hacienda desde el acceso Arroyo de la Hacienda con la calle Rosa Minutte del Fracc. El Rosedal.

Para conocer la topografía de la zona de estudio e identificar las discontinuidades geológicas presentes, se hizo un levantamiento topográfico (figuras 22 y 23) y fue necesario obtener los puntos de control geodésicos para poder georreferenciar el levantamiento. En la figura 24 y 25 se muestra el resultado del levantamiento.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes



Figura 22. Toma de puntos de control con equipo GPS de doble frecuencia Mca. ASTECH, modelo PROMARK-500.



Figura 23. Levantamiento topográfico con estación total Mca. Sokkia modelo 630-RK

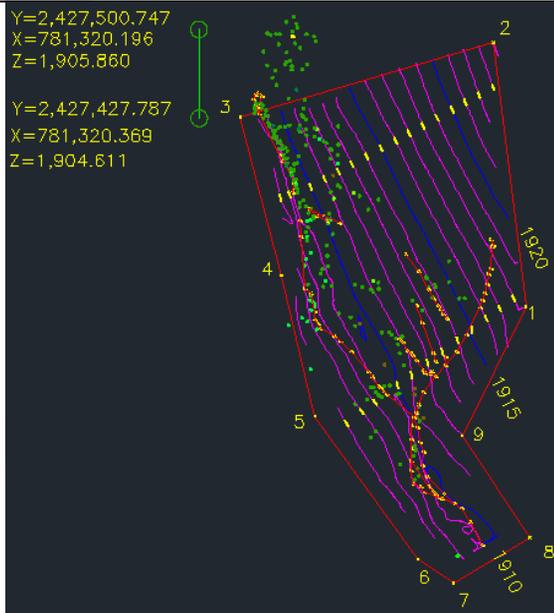


Figura 24, Primer levantamiento topográfico y trazo de discontinuidades geológicas

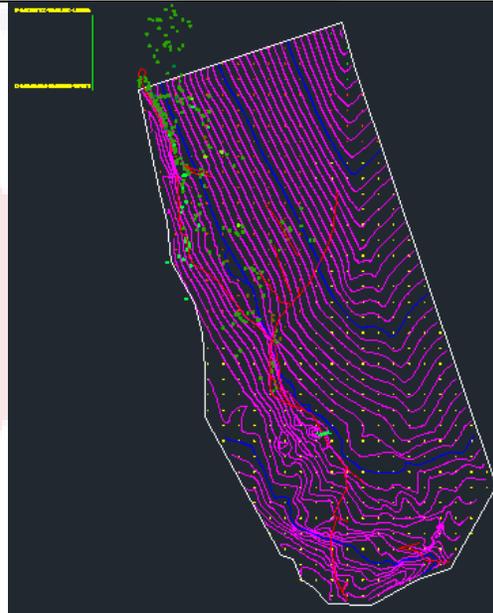


Figura 25. Complemento de levantamiento topográfico y trazo de discontinuidades geológicas

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2. Hidrología superficial para estimación del volumen de escurrimiento

3.2.1. Geomorfología de la cuenca

3.2.1.1. Localización de la cuenca hidrográfica de estudio (CE).

El punto de referencia tiene las coordenadas UTM 13 Q 781570, 2426916; el cual se ubica donde el Arroyo la Hacienda, mismo que está afectado por la falla oriente. La CE se delimitó con el apoyo del programa QGIS a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de una resolución de 15 metros, el cual se obtuvo del INEGI en su página de internet (INEGI, 2016). Esto puede visualizarse en la figura 26:

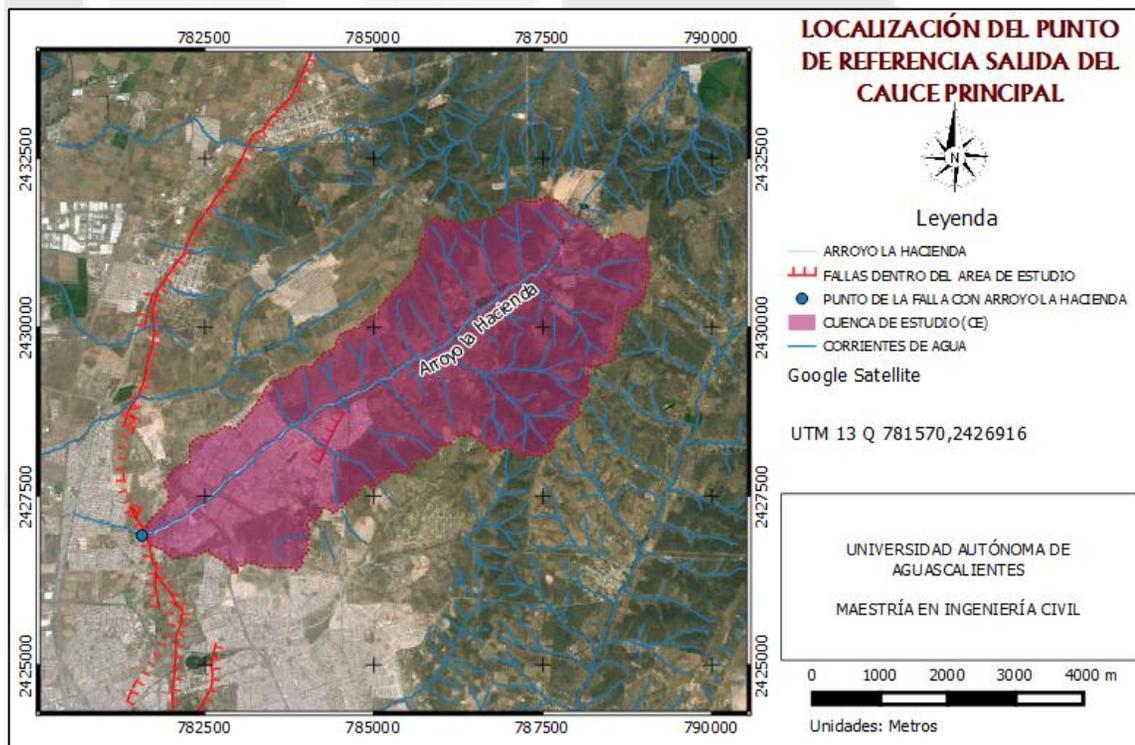


Figura 26. Localización del punto de referencia donde el Arroyo la Hacienda intercepta a la Falla oriente.

3.2.1.2. Área o magnitud de la cuenca

El área de la CE es de 18.808 km² y su perímetro es de 24.127 km. Lo anterior se determinó a partir de un MDE y procesado con el programa computacional QGIS y puede ser observado en la figura 27.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

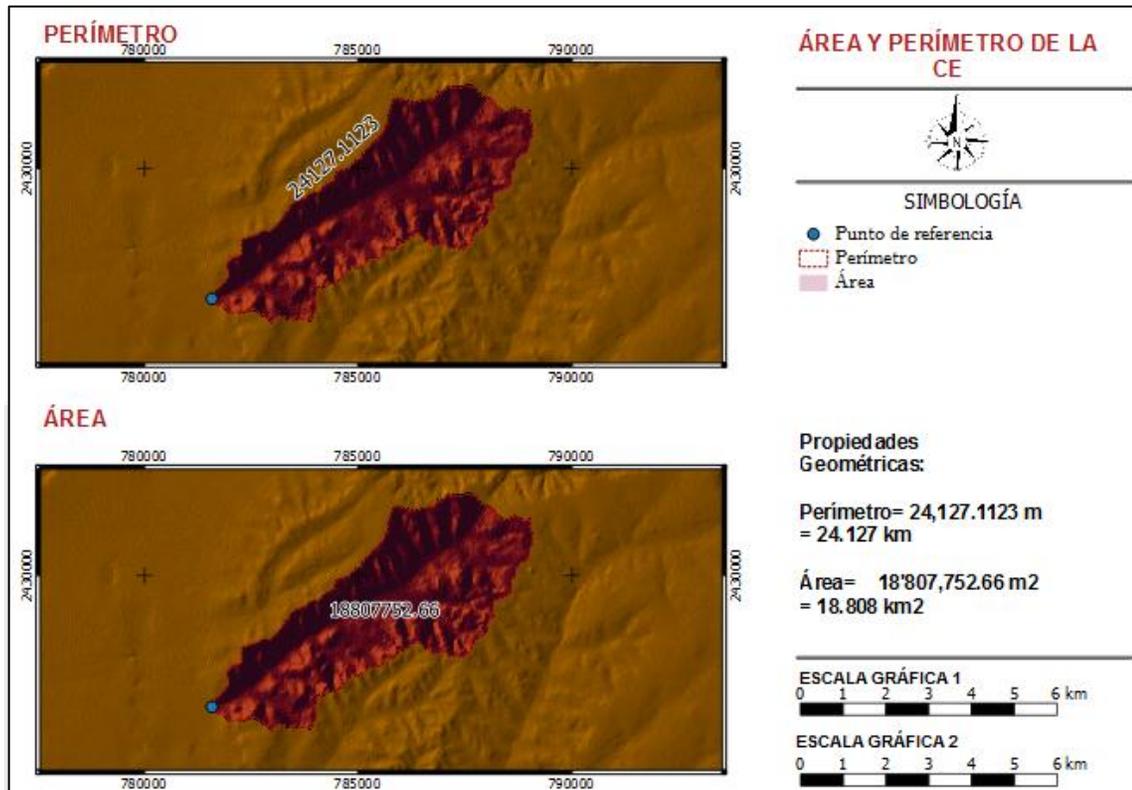


Figura 27. Área y perímetro de la CE.

La cuenca es muy pequeña según la clasificación según su tamaño (tabla 4), ya que la CE tiene una superficie menor que 25 km^2 . En la tabla 7 se observan los límites para su clasificación:

Tabla 7. Clasificación de las CE según su tamaño.

| Clasificación convencional | |
|----------------------------|---------------------------|
| ÁREA (KM ²) | Denominación |
| <25 | Muy pequeña |
| 25-250 | Pequeña |
| 250-500 | Intermedia-pequeña |
| 500-2,500 | Intermedia-grande |
| 2 500-5,000 | Grande |
| >5,000 | Muy grande |
| Su denominación es: | <25 Muy pequeña |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.1.3. Forma de la cuenca

3.2.1.3.1. Coeficiente de compacidad (Cc).

La CE de estudio tiene una forma alargada, puesto que el valor de coeficiente de compacidad (1.57) es mayor a la unidad. A continuación se observa la resolución del cálculo:

$$Cc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}} = 0.282 \frac{24.127 \text{ km}}{\sqrt{18.808 \text{ km}^2}} = 1.57 \text{ adim}$$

Ya que $1.57 > 1$; por lo tanto la CE tiene forma alargada y/o asimétrica.

3.2.1.3.2. Relación de elongación (Re)

Para obtener este cálculo se determinó la longitud de la cuenca (Lc), donde su valor es de 8.612 km. La cual se obtuvo a partir de QGIS, ver figura 28.

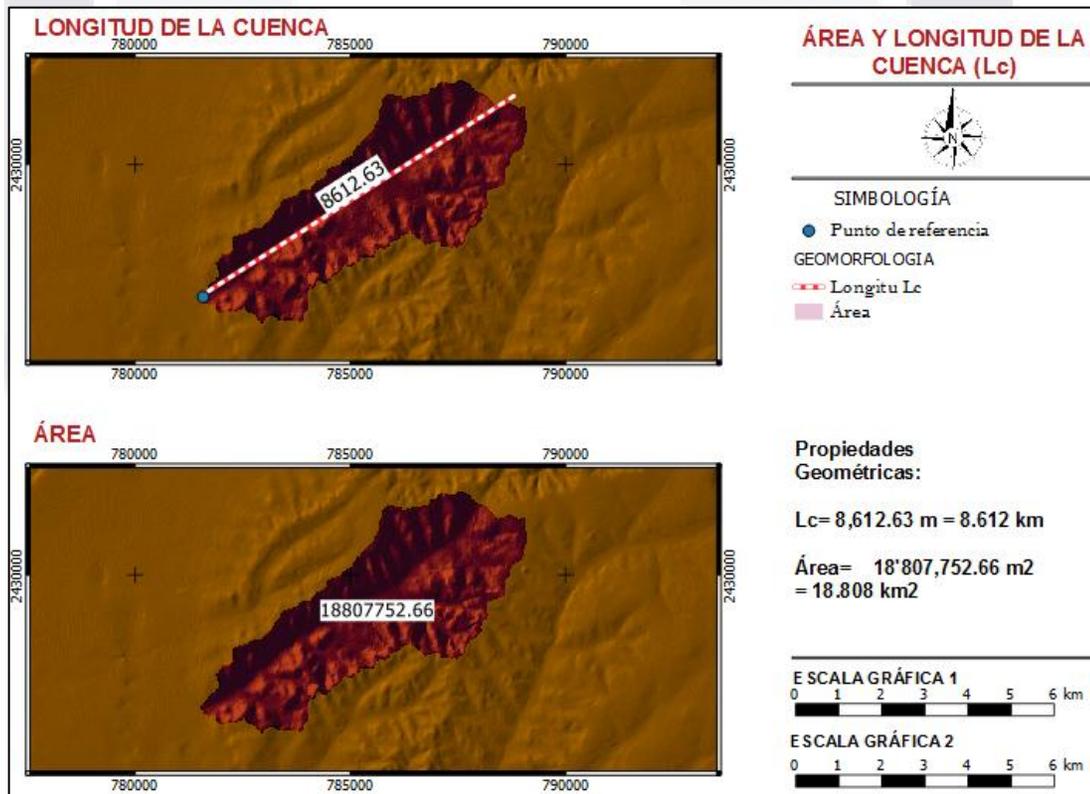


Figura 28. Área y Longitud de la cuenca (Lc).

La relación de elongación resulto ser:

$$Re = 1.1284 \frac{\sqrt{A}}{Lc} = 1.1284 \frac{\sqrt{18.808 \text{ km}^2}}{8.612 \text{ km}} = 0.57 \cong 0.6$$

Por lo tanto, tiene relieves altos y pendientes pronunciadas.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.1.4. Curva hipsométrica

Para la creación de la curva hipsométrica se requirió el área existente a cada 10 m de elevación en la CE, las cuales se obtuvieron a partir de QGIS como se observa en la figura 29. Así mismo, en la tabla 8 se muestra el resumen de estos resultados (amarillo) y los necesarios para graficar la curva hipsométrica.

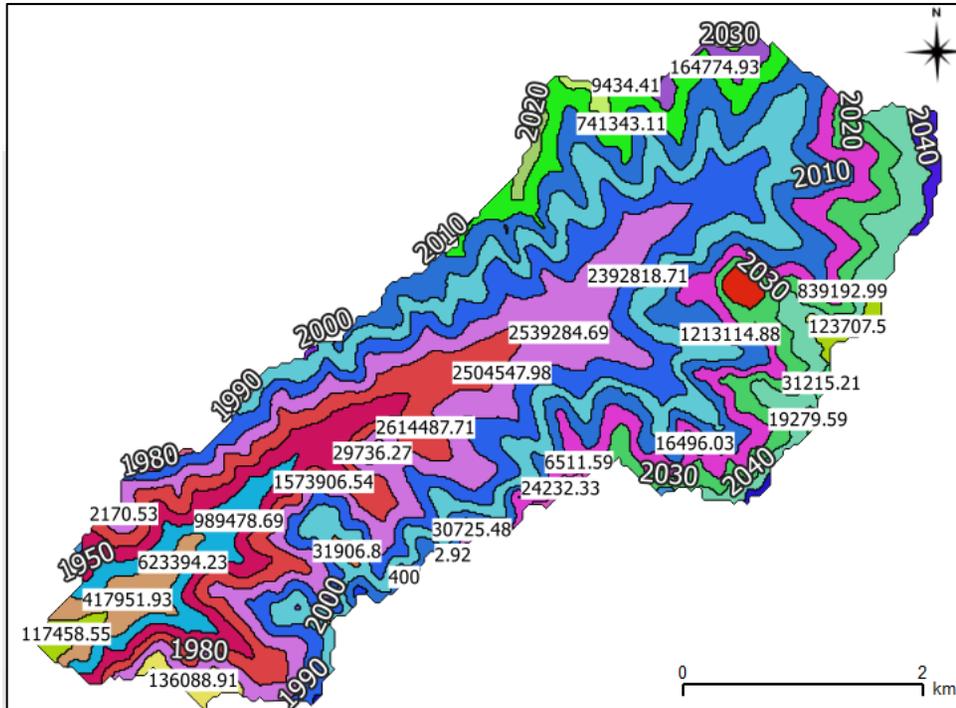


Figura 29. Superficie entre elevaciones para la Curva hipsométrica.

Tabla 8. Datos de la curva hipsométrica de la cuenca.

| Elevaciones msnm | | Área m ² | Área km ² | Área Acumulada km ² | Area % | Area Acumulada % |
|------------------|----------|---------------------|----------------------|--------------------------------|--------|------------------|
| 2,050.00 | 2,050.00 | - | - | - | 0% | 0% |
| 2,050.00 | 2,040.00 | 322,005.21 | 0.32 | 0.32 | 2% | 2% |
| 2,040.00 | 2,030.00 | 935,339.39 | 0.94 | 1.26 | 5% | 7% |
| 2,030.00 | 2,020.00 | 1,390,869.49 | 1.39 | 2.65 | 7% | 14% |
| 2,020.00 | 2,010.00 | 1,993,833.27 | 1.99 | 4.64 | 11% | 25% |
| 2,010.00 | 2,000.00 | 2,435,355.67 | 2.44 | 7.08 | 13% | 38% |
| 2,000.00 | 1,990.00 | 2,558,833.84 | 2.56 | 9.64 | 14% | 52% |
| 1,990.00 | 1,980.00 | 2,672,543.69 | 2.67 | 12.31 | 14% | 66% |
| 1,980.00 | 1,970.00 | 2,614,487.71 | 2.61 | 14.92 | 14% | 80% |
| 1,970.00 | 1,960.00 | 1,577,651.34 | 1.58 | 16.50 | 8% | 88% |
| 1,960.00 | 1,950.00 | 989,478.69 | 0.99 | 17.49 | 5% | 94% |
| 1,950.00 | 1,940.00 | 623,394.23 | 0.62 | 18.11 | 3% | 97% |
| 1,940.00 | 1,930.00 | 417,951.93 | 0.42 | 18.53 | 2% | 99% |
| 1,930.00 | 1,922.00 | 117,458.55 | 0.12 | 18.65 | 1% | 100% |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

La figura 30 muestra la curva hipsométrica para la CE, la cual, según la clasificación en la literatura de Martínez-Martínez (2011a) es de tipo geológico de B, que pertenece a una cuenca geológicamente madura o pie de montaña.

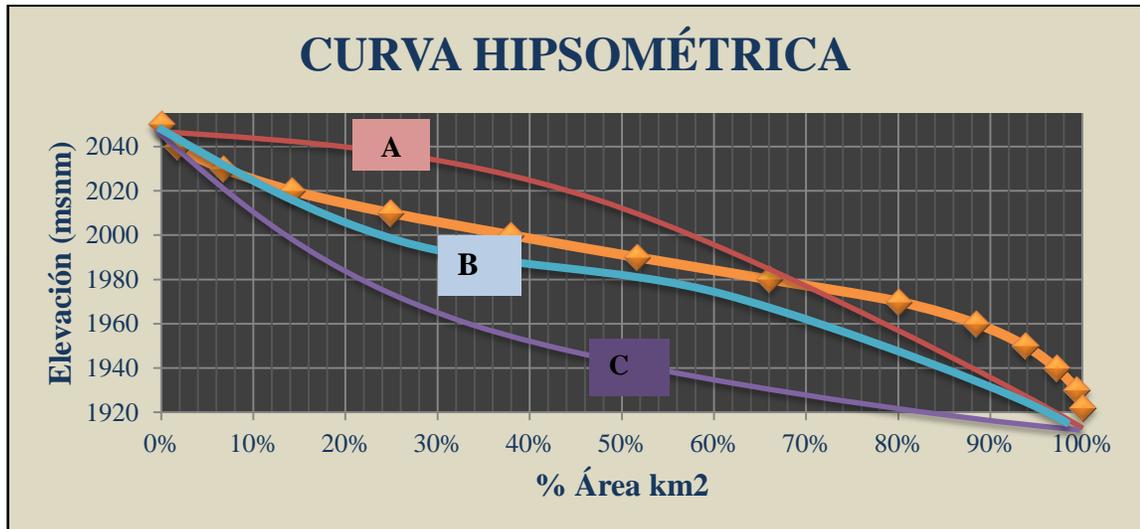


Figura 30 Curva hipsométrica de la CE.

3.2.1.5. Elevación media de la cuenca

El resultado de la elevación media de la cuenca es de 1974.42 msnm, que se calculó por el Tercer Criterio presentado en la literatura de Martínez-Martínez (2011a), ver tabla 9.

Tabla 9. Elevación media de la CE.

| Área bajo curva (msnm.km ²) $\int_0^A El dA$ | Elevación media de la cuenca msnm $\bar{El} = \frac{\int_0^A El dA}{A}$ |
|---|--|
| - | - |
| 658.50 | 35.01 |
| 1,903.42 | 101.20 |
| 2,816.51 | 149.75 |
| 4,017.57 | 213.61 |
| 4,882.89 | 259.62 |
| 5,104.87 | 271.42 |
| 5,305.00 | 282.06 |
| 5,163.61 | 274.55 |
| 3,100.08 | 164.83 |
| 1,934.43 | 102.85 |
| 1,212.50 | 64.47 |
| 808.74 | 43.00 |
| 226.23 | 12.03 |
| El media= | 1,974.42 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.1.6. Pendiente media de la cuenca

El resultado de la pendiente media de la cuenca es de 7.39 % y se calculó por el Criterio Alvord, presentado en la literatura de Martínez-Martínez (2011a), en la tabla 10 se muestran las longitudes de las curvas de nivel y el cálculo de la pendiente media.

Tabla 10. Pendiente media de la CE

| $S_c = \frac{D}{A}(l_1 + l_2 + l_3 + \dots + l_n)$ | | |
|--|------------------------------------|-----------------------------------|
| Area de la cuenca= | 18.81 | km ² |
| Desnivel constante entre curvas de nivel (km)= | 0.01 | km |
| Curva de nivel (m) | Longitud de la curva de nivel (km) | Longitud de la curva de nivel (m) |
| 2040 | 3.98 | 3,978.22 |
| 2030 | 7.03 | 7,034.89 |
| 2020 | 15.92 | 15,920.67 |
| 2010 | 19.74 | 19,739.04 |
| 2000 | 20.71 | 20,714.94 |
| 1990 | 20.09 | 20,090.62 |
| 1980 | 18.52 | 18,523.71 |
| 1970 | 13.79 | 13,787.65 |
| 1960 | 9.19 | 9,185.28 |
| 1950 | 5.80 | 5,799.75 |
| 1940 | 3.12 | 3,120.72 |
| 1930 | 1.02 | 1,019.26 |
| Σ | 138.91 | |
| Pendiente media de la cuenca= | 7.39% | adimensional |

3.2.1.7. Red de drenaje

En la tabla 11 se muestra un resumen de los cálculos referentes a la red de drenaje.

Tabla 11. Resumen red de drenaje de la CE.

| RESUMEN RED DE DRENAJE | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------|----|------|----------------------------|
| Orden de la cuenca | | | 4 | orden |
| Densidad de drenaje | $Dd = \frac{\Sigma L_u}{A}$ | Dd | 3.07 | km ⁻¹ |
| Densidad o frecuencia de corrientes | $F = \frac{\Sigma N_u}{A}$ | F | 4.79 | corrientes/km ² |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.2. Condiciones naturales de la cuenca

Las siguientes condiciones naturales que presenta la CE se obtuvieron a partir de la información vectorial que proporciona el INEGI en su página principal.

3.2.2.1. Hidrografía

La CE pertenece a la Subcuenca Hidrográfica RH12Ib, que específicamente pertenece al Río Aguascalientes, según los tres niveles de desagregación de la división de aguas superficiales (Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, 2010). Donde la Región Hidrográfica RH12 pertenece al Río Verde Grande.

El cauce principal de la CE es el Arroyo La Hacienda que corre de noreste a suroeste. Éste es uno de los afluentes importantes que drenan en el Río San Pedro, también llamado Río Aguascalientes (SEMADESU, 2011). En la figura 31 se muestra la Subcuenca Hidrográfica (RH12Ib), que es donde se encuentra la CE.

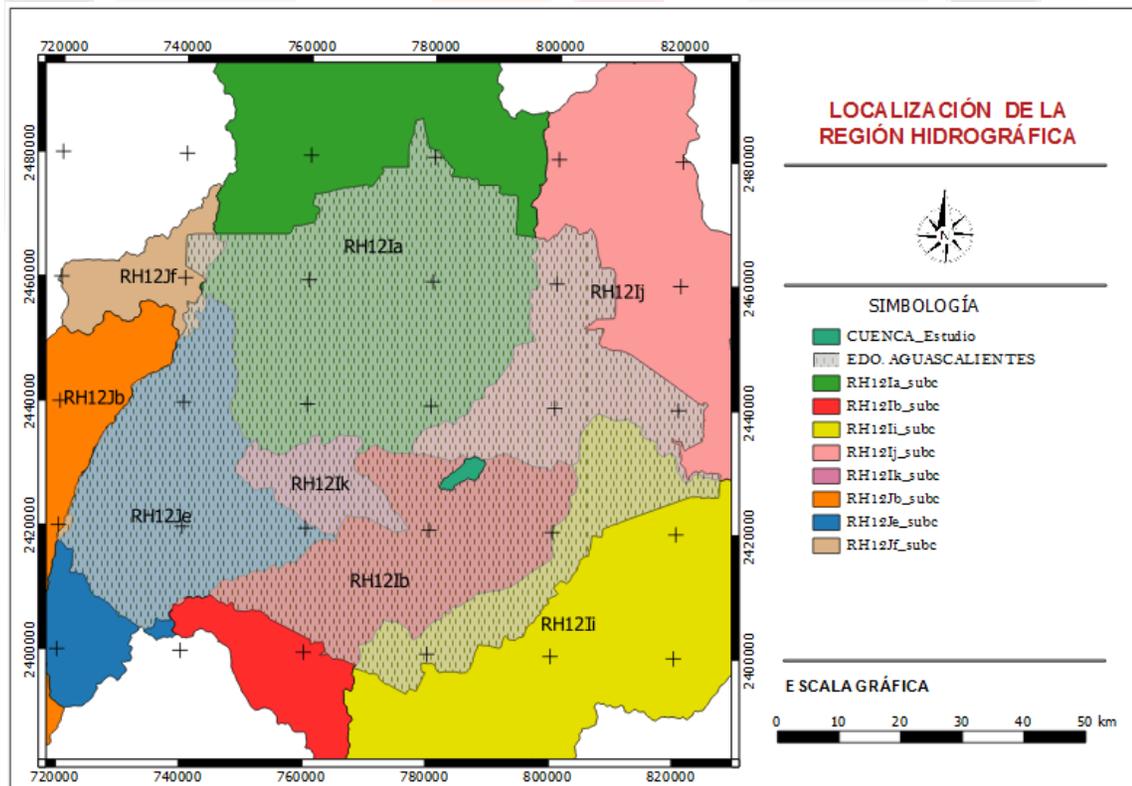


Figura 31. La cuenca pertenece a la Subcuenca Hidrográfica RH12Ib. Elaborado a partir de cartografía de CONAGUA (2007).

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.2.2. Fisiografía

La CE pertenece a la subprovincia fisiográfica “Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes”, que ésta a su vez, se encuentra en la provincia de Mesa del Centro. Mientras que su relieve es lomerío con cañadas, en sus puntos altos; y es “llanura desértica de piso rocoso o cementado” en sus puntos bajos. Estas clasificaciones son proporcionadas por el INEGI en sus capas vectoriales, ver figuras 32 y 33.

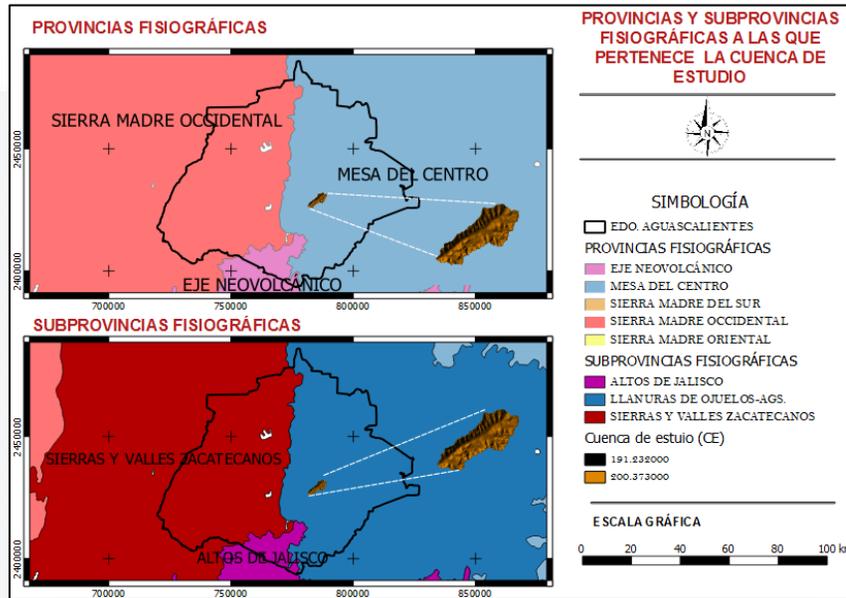


Figura 32. Provincia y subprovincia fisiográfica a la que pertenece la CE. Elaborado a partir de la información del INEGI (s/f-b).

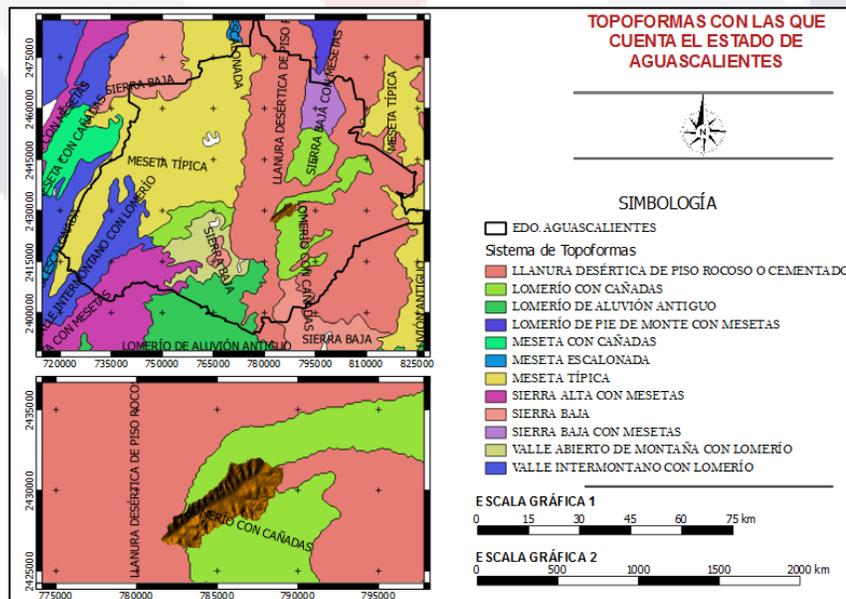


Figura 33. Topografías o relieves que caracterizan a la CE. Elaborado a partir de la información del INEGI (s/f-b)

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.2.3. Geología

Referente a los ambientes geológicos presentes en la CE, donde corresponde a una clase de roca sedimentaria de tipo “Arenisca-Conglomerado”, donde en la parte más baja de la cuenca está en los límites con un suelo, que es donde se forma una discontinuidad geológica. Esto se puede visualizar en la figura 34, mientras que las características geológicas de suelo y rocas se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Características geológicas de la CE y zonas aledañas. Elaborada a partir de atributos de las capas vectoriales proporcionadas por el INEGI (s/f-d).

| ENTIDAD | CLASE | TIPO | ERA | SISTEMA |
|----------------------------|-----------------|-----------------------|-----------|-------------|
| Suelo | N/A | N/A | Cenozoico | Cuaternario |
| Unidad Cronoestratigráfica | Ígnea extrusiva | Ígnea extrusiva ácida | Cenozoico | Neógeno |
| Unidad Cronoestratigráfica | Sedimentaria | Arenisca-Conglomerado | Cenozoico | Neógeno |
| Unidad Cronoestratigráfica | Metamórfica | Esquisto | Mesozoico | Triásico |

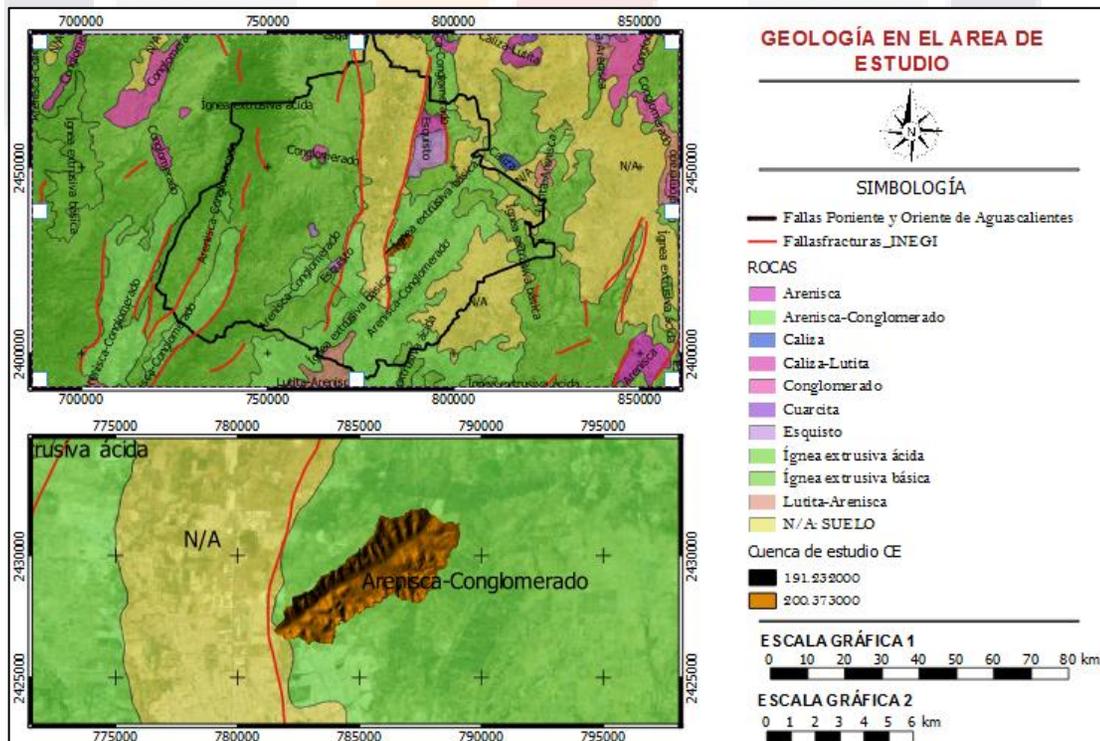


Figura 34. Características geológicas en la CE.
Elaborado a partir de la información del INEGI (s/f-c)

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.2.4. Climatología

En la CE la mayoría de la superficie pertenece a un clima “semiseco templado”, y una porción pequeña a “semiseco-semicálido”, según las unidades climáticas proporcionadas por el INEGI, lo anterior puede ser visualizado en la figura 35.

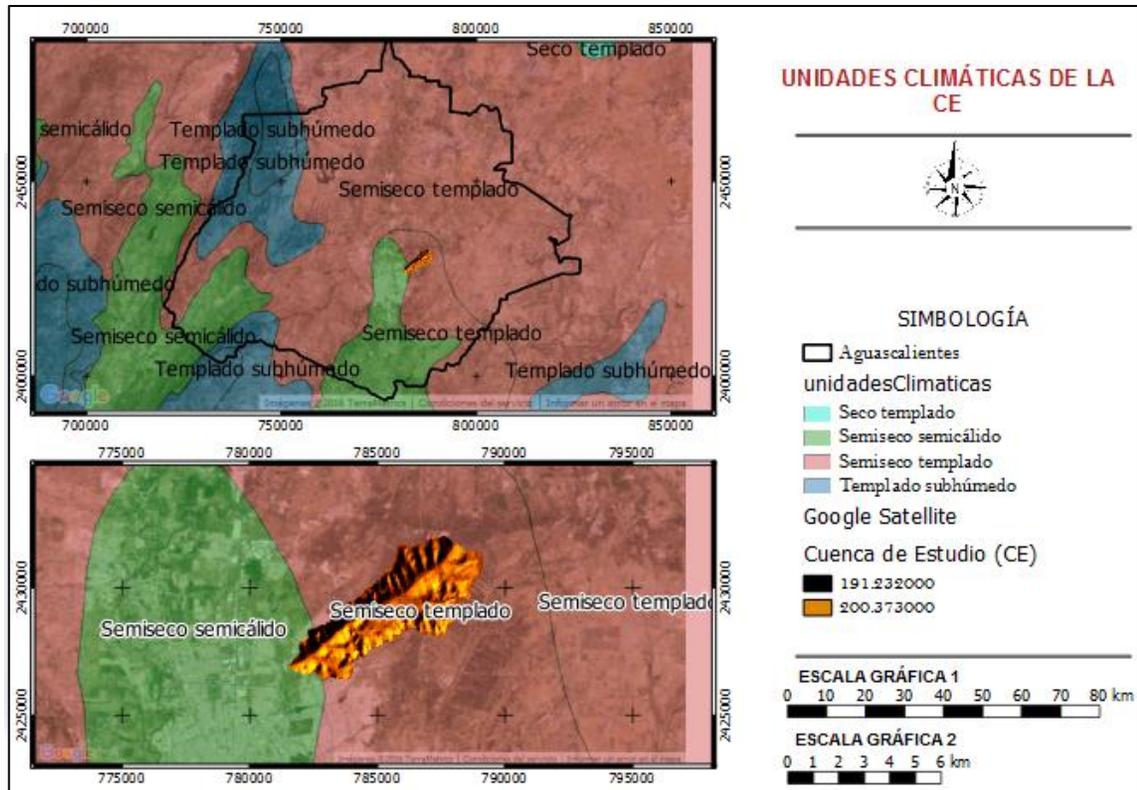


Figura 35. Unidades climáticas presentes en la CE.
Elaborado a partir de la información del (INEGI, s/f-a).

Como no se cuenta con estaciones climatológicas dentro de la CE, se utilizaron las estaciones más cercanas a ella, las cuales son la Aguascalientes II (1097) y la estación Cañada Honda (1004). Las cuales tienen influencia en la CE, según lo determinado a partir de método de los polígonos de Thiessen. En la tabla 13 se muestran los resultados del área de influencia de cada estación en la CE.

Tabla 13. Áreas de influencia de cada estación pluviométrica en la CE

| Estación | m ² | km ² | % |
|-----------------------------|----------------------|-----------------|-------------|
| CAÑADA HONDA, No. 1004 | 6,703,415.69 | 6.70 | 36% |
| AGUASCALIENTES II, No. 1097 | 12,104,336.97 | 12.10 | 64% |
| ÁREA TOTAL (CE) | 18,807,752.66 | 18.81 | 100% |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

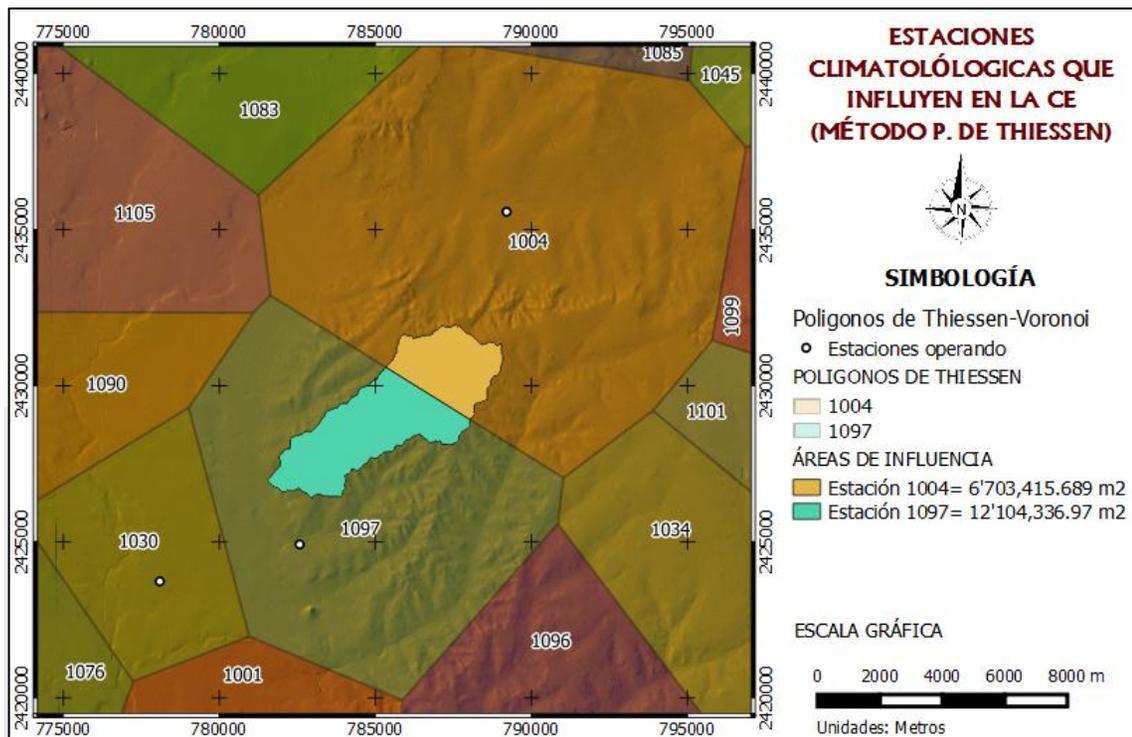


Figura 36. Estaciones climatológicas que influyen en la CE, a partir del método de polígonos de Thiessen.

La CONAGUA a través de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, de la Dirección Aguascalientes, proporcionó la base de datos climatológicos de las estaciones necesarias para el estudio. Para este estudio se requirió información de las estaciones Aguascalientes II (1097) y Cañada Honda (1004). Donde la primera estación cuenta con 15 años de registros (1995-2013), y la estación Cañada Honda cuenta con 44 años (1970-2013). Y donde cada uno de los periodos presenta faltantes de registros. Ésta información se puede visualizar en los anexos A-1 y A-2, respectivamente.

Para la estación Aguascalientes II (1097) se estimaron los datos faltantes del periodo 1995-2013 con el Método del US National Weather Service, a partir de las consideraciones mostradas en la tabla 14, que incluyen las distancias requeridas para el cálculo, ver figura 37. En la figura 37 se determinaron las distancias de las estaciones climatológicas circundantes (más cercanas) a las estaciones climatológicas 1097 y 1004.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

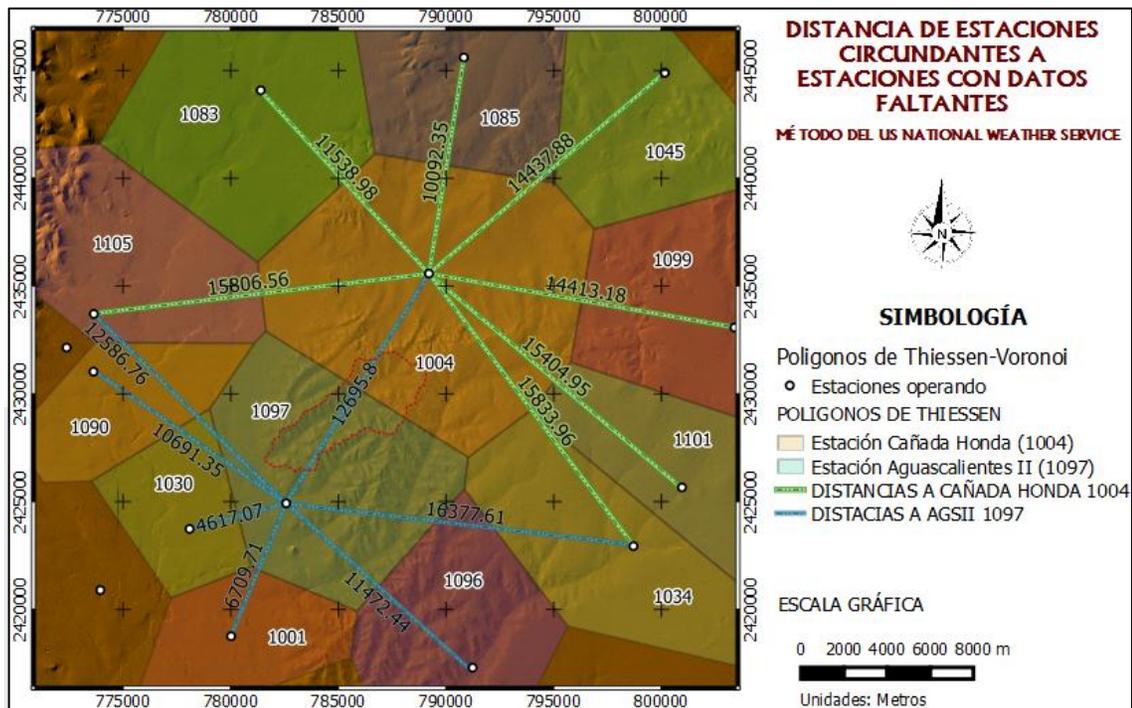


Figura 37. Distancias entre las estaciones de influencia en la CE y las estaciones circundantes más cercanas.

Tabla 14. Consideraciones para Método Del Us National Weather Service, en la estación Aguascalientes II (1097).

| ESTACIONES CIRCUNDANTES | | DISTANCIA A LA ESTACIÓN (KM) | AÑO Y MES ESTIMADO DE DATOS FALTANTES: |
|-------------------------|------|------------------------------|--|
| Los Cuartos | 1105 | 11.376 | 1995 (Ene-Jul) 2012 (Ago-Dic) 2013 (Ene) Ecuación: $p_x = \frac{\sum \frac{p_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}}$ |
| Calvillito | 1096 | 11.472 | |
| Sandoval | 1034 | 16.377 | |
| Observatorio | 1001 | 6.709 | |
| Aguascalientes | 1030 | 4.617 | |
| Jesús María | 1090 | 10.691 | |
| Cañada Honda | 1004 | 12.696 | |

Las precipitaciones estimadas (faltantes) en la estación Aguascalientes II para el año 1995 se muestran en la tabla 15, y los de los años 2012 y 2013 en la tabla 16. En estas tablas se visualiza las precipitaciones medias mensuales de las estaciones circundantes para cada registro, que en base a la restricción del método de del US National Weather Service se debe tener mínimo 2 estaciones con datos.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 15. Datos faltantes para para el año de 1995 en la estación 1097 con Método del Us National Weather Service

| ESTACIONES CIRCUNDANTES | | INICIO DE OPERACIÓN | PRECIPITACIÓN MEDIA DEL MES, PARA EL AÑO 1995 | | | | | | | |
|-------------------------------|------|---------------------|---|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|---------------|-----|
| | | | E | F | M | A | M' | J | J' | |
| Los Cuartos | 1105 | 2001 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| Calvillito | 1096 | 1983 | 0.00 | 5.50 | 0.00 | 0.00 | 28.50 | 88.00 | 143.00 | |
| Sandovalés | 1034 | 1972 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 38.00 | 108.00 | |
| Observatorio | 1001 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| Aguascalientes | 1030 | 1947 | 3.90 | 1.70 | 0.00 | 0.20 | 37.80 | 58.60 | 120.00 | |
| Jesús María | 1090 | 1979 | 6.00 | 6.00 | 0.00 | 0.00 | 15.00 | 119.00 | 135.50 | |
| Cañada Honda | 1004 | 1970 | 3.30 | 2.70 | 0.00 | 0.00 | 23.70 | 43.50 | 96.10 | |
| PRECIPITACIÓN ESTIMADA | | Px | 3.50 | 2.86 | 0.00 | 0.13 | 30.99 | 66.54 | 121.60 | |

Tabla 16. Datos faltantes para para el año de 2012 y 2013 de la estación 1097 con Método del Us National Weather Service

| ESTACIONES CIRCUNDANTES | | INICIO DE OPERACIÓN | PRECIPITACIÓN MEDIA DEL MES PARA EL AÑO 2012 | | | | | PRECIPITACIÓN MEDIA DEL MES PARA EL AÑO 2013 |
|-------------------------------|------|---------------------|--|---------------|-------------|-------------|--------------|--|
| | | | A' | S | O | N | D | Enero |
| Los Cuartos | 1105 | 2001 | 123 | 96.4 | 8 | 0 | 12.5 | 68.50 |
| Calvillito | 1096 | 1983 | 99.60 | 52.30 | 8.70 | 4.00 | 9.00 | 59.50 |
| Sandovalés | 1034 | 1972 | 146.00 | 51.50 | 1.00 | 0.00 | 5.00 | 62.00 |
| Observatorio | 1001 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D |
| Aguascalientes | 1030 | 1947 | 64.90 | 133.20 | 4.40 | 0.00 | 10.40 | 58.50 |
| Jesús María | 1090 | 1979 | 90.50 | 86.00 | 16.00 | 1.50 | 18.80 | 7.00 |
| Cañada Honda | 1004 | 1970 | 38.10 | 90.00 | 3.50 | 0.20 | 8.70 | S/D |
| PRECIPITACIÓN ESTIMADA | | Px | 77.36 | 110.15 | 6.14 | 0.56 | 10.97 | 53.50 |

En la tabla 17 se muestran los datos faltantes (celdas rojas) y la precipitación media acumulada de la estación 1097 (celda verde). Donde, de los datos faltantes estimados para la estación se arrojó una precipitación media acumulada de 525.8mm.

Para la estación Cañada Honda (1004) se estimaron los datos faltantes de los años de 1970 y 1972 a partir del Método Racional Deductivo, puesto que las estaciones circundantes no cuentan con datos para esos años. Mientras que para el dato faltante del mes de Enero del año 2013 se estimó con el Método del US National Weather Service; las consideraciones y los resultados de los datos faltantes en la estación se muestran en las tablas 18 y 19, respectivamente.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 17. Determinación de la precipitación media acumulada (verde) en la estación climatológica Aguascalientes II (1097), a partir del resultado de los datos faltantes (celdas rojas).

| AÑO | E | F | M | A | M' | J | J' | A' | S | O | N | D | ACUM | MEDIA | MES |
|------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|-------|-----|
| 1995 | 3.5 | 2.9 | 0.0 | 0.1 | 31.0 | 66.5 | 121.6 | 165.3 | 99.9 | 2.3 | 7.8 | 6.3 | 507.22 | 42.3 | 12 |
| 1996 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 14.0 | 4.0 | 40.2 | 38.3 | 71.5 | 160.5 | 89.0 | 0.0 | 0.0 | 417.50 | 34.8 | 12 |
| 1997 | 0.0 | 18.0 | 9.0 | 50.0 | 10.3 | 88.0 | 59.0 | 29.5 | 33.5 | 20.0 | 26.5 | 0.0 | 343.80 | 28.7 | 12 |
| 1998 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 88.0 | 78.1 | 96.2 | 17.0 | 1.0 | 0.0 | 382.30 | 31.9 | 12 |
| 1999 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 77.0 | 107.5 | 132.0 | 107.7 | 4.7 | 0.0 | 0.0 | 428.90 | 35.7 | 12 |
| 2000 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 61.5 | 123.0 | 75.5 | 54.5 | 43.7 | 12.5 | 0.0 | 34.0 | 404.70 | 33.7 | 12 |
| 2001 | 0.0 | 7.5 | 21.0 | 35.5 | 25.5 | 95.0 | 106.5 | 114.7 | 101.8 | 10.9 | 0.0 | 0.7 | 519.10 | 43.3 | 12 |
| 2002 | 34.0 | 21.1 | 0.0 | 10.0 | 35.7 | 62.0 | 145.4 | 79.0 | 152.0 | 66.0 | 40.0 | 0.0 | 645.20 | 53.8 | 12 |
| 2003 | 2.5 | 1.2 | 0.0 | 0.0 | 3.0 | 119.7 | 184.4 | 102.5 | 137.7 | 46.0 | 2.0 | 0.0 | 599.00 | 49.9 | 12 |
| 2004 | 39.4 | 1.0 | 26.5 | 0.0 | 45.5 | 247.7 | 131.8 | 84.7 | 110.8 | 21.5 | 0.0 | 0.0 | 708.90 | 59.1 | 12 |
| 2005 | 0.0 | 46.8 | 8.2 | 0.0 | 12.5 | 13.3 | 158.0 | 217.2 | 26.7 | 14.5 | 0.0 | 2.2 | 499.40 | 41.6 | 12 |
| 2006 | 2.9 | 9.3 | 0.0 | 0.0 | 58.7 | 55.6 | 134.3 | 126.9 | 66.5 | 129.0 | 28.5 | 10.0 | 621.70 | 51.8 | 12 |
| 2007 | 27.2 | 17.5 | 0.0 | 0.0 | 12.4 | 276.5 | 169.9 | 40.3 | 62.9 | 14.0 | 1.0 | 2.3 | 624.00 | 52.0 | 12 |
| 2008 | 0.0 | 20.0 | 0.0 | 9.0 | 2.5 | 72.7 | 203.1 | 352.7 | 91.0 | 1.2 | 0.0 | 0.0 | 752.20 | 62.7 | 12 |
| 2009 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 40.0 | 7.9 | 52.5 | 50.3 | 119.0 | 111.9 | 31.6 | 13.5 | 4.0 | 430.70 | 35.9 | 12 |
| 2010 | 46.2 | 109.1 | 0.0 | 0.0 | 7.5 | 61.6 | 159.7 | 90.2 | 68.6 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 542.92 | 45.2 | 12 |
| 2011 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 85.6 | 19.9 | 77.9 | 85.2 | 18.7 | 1.0 | 0.0 | 288.30 | 24.0 | 12 |
| 2012 | 9.7 | 53.4 | 0.0 | 0.0 | 7.2 | 96.0 | 150.5 | 77.3 | 110.2 | 6.1 | 0.6 | 11.0 | 521.93 | 43.5 | 12 |
| 2013 | 53.5 | 0.0 | 2.0 | 0.0 | 19.0 | 145.2 | 196.5 | 75.5 | 117.9 | 31.8 | 38.0 | 73.0 | 752.40 | 62.7 | 12 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|--------|------|
| MIN. | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 13.3 | 19.9 | 29.5 | 26.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 288.30 | 24.0 |
| MAX. | 53.5 | 109.1 | 26.5 | 50.0 | 61.5 | 276.5 | 203.1 | 352.7 | 160.5 | 129.0 | 40.0 | 73.0 | 752.40 | 62.7 |
| MEDIA | 11.5 | 16.3 | 3.5 | 8.3 | 18.1 | 98.8 | 121.1 | 109.9 | 93.9 | 28.3 | 8.4 | 7.6 | 525.80 | 43.8 |
| DESV. E. | 18.3 | 27.4 | 7.7 | 15.7 | 19.6 | 65.4 | 54.2 | 73.3 | 37.0 | 33.4 | 13.9 | 17.8 | 135.59 | 11.3 |

Tabla 18. Datos faltantes de los años 1970 y 1972 de la estación Cañada Honda (1004) y sus consideraciones para el Método Racional Deductivo.

| Año | Mes | Período | No. valores | Sumatoria de precipitaciones en los períodos | No. de datos faltantes | Observaciones | Px |
|------|-----|-----------------------|-------------|--|------------------------|--------------------|--------|
| 1970 | ENE | 1971-2012 | 42 | 747.3 | 2 | Aplica >20 valores | 17.793 |
| | FEB | 1971-2013 | 43 | 441.6 | 1 | Aplica >20 valores | 10.270 |
| 1972 | NOV | 1970-1971 y 1973-2013 | 43 | 429.6 | 1 | Aplica >10 valores | 9.991 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 19. Dato faltante Enero del 2013 y consideraciones para Método Del Us National Weather Service, de la estación Cañada Honda (1004).

| ESTACIONES CIRCUNDANTES | | INICIO | DIST. (KM) | M E S | A Ñ O | PRECI P IT A C I Ó N | O B S | $\sum Pi/di^2$ | $\sum 1/di^2$ | Px |
|---------------------------|------|--------|------------|-------|-------|----------------------|------------------------------------|----------------|---------------|---|
| Ags II | 1097 | 1995 | 12.70 | ENERO | 2013 | S/D | SI aplica por tener más de 2 datos | N/A | N/A | $p_x = \frac{\sum \frac{p_i}{d_i^2}}{\sum \frac{1}{d_i^2}}$ |
| Los Cuartos | 1105 | 2001 | 15.81 | | | 68.5 | | 0.274 | 0.004 | |
| San Francisco De Los Romo | 1083 | 1979 | 11.54 | | | 69.8 | | 0.524 | 0.008 | |
| Tepetatillo | 1085 | 1979 | 10.09 | | | 59 | | 0.579 | 0.010 | |
| El Tule | 1045 | 1974 | 14.44 | | | 55 | | 0.264 | 0.005 | |
| Jesús Terán (El Muerto) | 1099 | 1985 | 14.41 | | | 62 | | 0.298 | 0.005 | |
| Las Presas | 1101 | 1986 | 15.40 | | | 56.4 | | 0.238 | 0.004 | |
| Sandoval | 1034 | 1972 | 15.83 | | | 62 | | 0.247 | 0.004 | |
| | | | | | | | | 2.425 | 0.039 | 61.948 |

La precipitación media acumulada para la estación Cañada Honda fue 497.94 mm considerando los datos faltantes antes calculados. El periodo de la estación quedó de 1970 al 2013 y los datos faltantes (celdas rojas) y la precipitación media acumulada de la estación 1004 (celda verde) se muestran en la tabla 21.

Finalmente para conocer la precipitación media de la cuenca a partir del método de Polígonos de Thiessen, se tomaron las precipitaciones medias acumuladas de las estaciones Aguascalientes II y Cañada Honda, calculadas anteriormente, y su área de influencia en la cuenca. Con esto se logró estimar que la precipitación media de la cuenca es de 515.87mm, el cálculo se puede visualizar en la tabla 20.

Tabla 20. Precipitación media de la CE por el Método de Polígonos de Thiessen.

| | | AGS II | C. H. | TOTAL |
|--|--------------------|--|----------|-----------------|
| | | 1097 | 1004 | |
| Precipitación media acumulada | mm | 525.80 | 497.94 | |
| Area de influencia | km ² | 12.10 | 6.70 | 18.808 |
| Productos (Pi) (Ai) | mm*km ² | 6,364.44 | 3,337.92 | 9,702.36 |
| Precipitación media anual de la cuenca | mm | $\bar{p} = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n p_i A_i$ | | 515.87 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 21. Determinación de la precipitación media acumulada (verde) en la estación climatológica Cañada Honda (1004), a partir del resultado de los datos faltantes (celdas rojas).

| ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-----------|-------|-------|-------|--------|--------|---|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|
| ESTACIÓN: | CAÑADA H. | | | | | | NOTA: LOS DATOS FALTANTES ESTIMADOS ESTAN EN CELDAS ROJAS | | | | | | | | |
| AÑO | E | F | M | A | M' | J | J' | A' | S | O | N | D | Σ | MEDIA | MESES |
| 1970 | 17.79 | 10.27 | 0.00 | 0.00 | 5.00 | 142.10 | 128.00 | 121.00 | 161.70 | 17.50 | 20.50 | 0.00 | 623.86 | 51.99 | 12 |
| 1971 | 4.20 | 0.00 | 4.00 | 0.00 | 66.00 | 193.50 | 44.30 | 117.20 | 188.90 | 16.90 | 0.00 | 1.30 | 636.30 | 53.03 | 12 |
| 1972 | 5.90 | 0.00 | 23.00 | 6.50 | 126.00 | 97.50 | 82.50 | 75.50 | 90.50 | 21.00 | 9.99 | 2.00 | 540.39 | 45.03 | 12 |
| 1973 | 30.00 | 10.00 | 0.00 | 0.00 | 7.00 | 89.00 | 127.50 | 197.50 | 19.50 | 120.60 | 0.00 | 0.00 | 601.10 | 50.09 | 12 |
| 1974 | 2.30 | 1.70 | 6.20 | 2.20 | 11.20 | 8.80 | 111.40 | 101.40 | 95.30 | 10.90 | 4.50 | 17.50 | 373.40 | 31.12 | 12 |
| 1975 | 21.10 | 0.60 | 0.00 | 7.50 | 13.20 | 87.20 | 160.50 | 143.10 | 6.40 | 2.80 | 0.00 | 10.70 | 453.10 | 37.76 | 12 |
| 1976 | 1.30 | 0.00 | 0.10 | 3.40 | 2.40 | 24.10 | 340.50 | 13.50 | 63.70 | 56.10 | 68.50 | 16.80 | 590.40 | 49.20 | 12 |
| 1977 | 1.50 | 0.00 | 0.00 | 0.60 | 1.90 | 77.70 | 95.30 | 122.80 | 48.30 | 33.30 | 5.50 | 5.00 | 391.90 | 32.66 | 12 |
| 1978 | 0.00 | 5.00 | 0.00 | 0.00 | 18.00 | 56.70 | 139.70 | 144.30 | 135.30 | 93.10 | 3.80 | 4.60 | 600.50 | 50.04 | 12 |
| 1979 | 0.00 | 8.80 | 0.00 | 0.00 | 10.90 | 18.20 | 52.20 | 130.70 | 88.40 | 0.00 | 0.00 | 1.50 | 310.70 | 25.89 | 12 |
| 1980 | 47.80 | 15.50 | 0.00 | 12.50 | 0.00 | 10.00 | 40.50 | 168.10 | 64.00 | 42.00 | 21.50 | 28.00 | 449.90 | 37.49 | 12 |
| 1981 | 64.40 | 32.00 | 2.00 | 36.00 | 23.00 | 31.00 | 78.40 | 61.00 | 44.00 | 11.50 | 24.00 | 0.00 | 407.30 | 33.94 | 12 |
| 1982 | 0.00 | 0.00 | 0.30 | 5.00 | 11.50 | 3.00 | 92.00 | 84.40 | 25.90 | 63.40 | 39.50 | 40.30 | 365.30 | 30.44 | 12 |
| 1983 | 28.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 33.00 | 63.40 | 233.10 | 119.90 | 90.00 | 25.20 | 12.50 | 0.00 | 605.10 | 50.43 | 12 |
| 1984 | 27.80 | 4.20 | 0.00 | 0.00 | 28.30 | 98.70 | 170.10 | 101.70 | 38.90 | 11.80 | 0.00 | 6.00 | 487.50 | 40.63 | 12 |
| 1985 | 6.30 | 1.00 | 0.00 | 35.30 | 17.40 | 103.30 | 38.30 | 107.70 | 30.90 | 34.30 | 0.00 | 22.70 | 397.20 | 33.10 | 12 |
| 1986 | 0.00 | 8.20 | 0.00 | 3.30 | 5.00 | 203.80 | 45.80 | 33.50 | 138.20 | 85.90 | 20.90 | 0.20 | 544.80 | 45.40 | 12 |
| 1987 | 45.70 | 50.00 | 0.00 | 15.20 | 54.60 | 69.30 | 138.00 | 44.20 | 52.00 | 0.00 | 0.00 | 1.20 | 470.20 | 39.18 | 12 |
| 1988 | 23.20 | 0.20 | 6.80 | 24.90 | 0.00 | 56.90 | 137.20 | 83.20 | 93.50 | 3.50 | 1.10 | 2.30 | 432.80 | 36.07 | 12 |
| 1989 | 0.50 | 0.20 | 0.00 | 0.00 | 18.60 | 18.00 | 55.80 | 115.70 | 52.60 | 0.20 | 18.30 | 41.50 | 321.40 | 26.78 | 12 |
| 1990 | 12.60 | 28.90 | 0.00 | 0.80 | 28.70 | 33.30 | 203.40 | 195.30 | 80.10 | 75.40 | 0.00 | 0.00 | 658.50 | 54.88 | 12 |
| 1991 | 0.00 | 6.20 | 0.00 | 0.00 | 2.00 | 85.30 | 519.20 | 38.10 | 139.20 | 17.20 | 0.40 | 9.50 | 817.10 | 68.09 | 12 |
| 1992 | 183.40 | 3.30 | 1.00 | 18.00 | 35.70 | 27.40 | 151.00 | 81.90 | 25.30 | 88.20 | 18.00 | 6.70 | 639.90 | 53.33 | 12 |
| 1993 | 27.30 | 0.20 | 0.00 | 2.50 | 19.90 | 141.00 | 116.50 | 46.60 | 36.90 | 10.70 | 0.60 | 0.00 | 402.20 | 33.52 | 12 |
| 1994 | 9.70 | 0.00 | 0.30 | 26.30 | 19.90 | 106.90 | 40.20 | 64.70 | 82.80 | 35.70 | 0.00 | 0.30 | 386.80 | 32.23 | 12 |
| 1995 | 3.30 | 2.70 | 0.00 | 0.00 | 23.70 | 43.50 | 96.10 | 232.20 | 107.50 | 0.00 | 7.70 | 22.40 | 539.10 | 44.93 | 12 |
| 1996 | 0.00 | 1.50 | 0.00 | 16.70 | 5.60 | 33.50 | 30.20 | 97.20 | 108.10 | 108.90 | 0.50 | 0.00 | 402.20 | 33.52 | 12 |
| 1997 | 37.20 | 20.00 | 13.30 | 43.60 | 18.10 | 71.80 | 58.00 | 79.60 | 25.10 | 32.90 | 27.00 | 23.20 | 449.80 | 37.48 | 12 |
| 1998 | 0.00 | 1.70 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 75.90 | 48.80 | 87.90 | 184.50 | 41.40 | 0.20 | 0.00 | 440.40 | 36.70 | 12 |
| 1999 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 4.00 | 38.40 | 134.10 | 124.80 | 61.00 | 0.70 | 0.00 | 0.00 | 363.00 | 30.25 | 12 |
| 2000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 64.30 | 117.70 | 51.90 | 66.30 | 9.00 | 17.40 | 0.50 | 37.10 | 364.20 | 30.35 | 12 |
| 2001 | 2.40 | 0.30 | 26.30 | 33.50 | 18.80 | 42.40 | 71.90 | 97.00 | 137.70 | 8.30 | 0.40 | 16.70 | 455.70 | 37.98 | 12 |
| 2002 | 47.20 | 24.80 | 0.00 | 0.00 | 28.50 | 109.40 | 212.60 | 110.30 | 131.50 | 95.40 | 47.20 | 0.00 | 806.90 | 67.24 | 12 |
| 2003 | 4.40 | 1.40 | 0.00 | 0.00 | 41.00 | 97.80 | 169.50 | 116.40 | 174.80 | 60.70 | 0.30 | 0.00 | 666.30 | 55.53 | 12 |
| 2004 | 38.80 | 2.50 | 35.20 | 0.80 | 83.20 | 188.40 | 103.80 | 86.60 | 106.90 | 5.40 | 0.10 | 0.00 | 651.70 | 54.31 | 12 |
| 2005 | 0.00 | 45.30 | 10.80 | 0.00 | 31.80 | 31.00 | 55.60 | 126.60 | 41.90 | 1.00 | 0.80 | 2.40 | 347.20 | 28.93 | 12 |
| 2006 | 4.20 | 0.50 | 0.00 | 2.40 | 48.40 | 26.60 | 69.70 | 83.90 | 130.40 | 73.80 | 20.00 | 11.70 | 471.60 | 39.30 | 12 |
| 2007 | 21.90 | 14.70 | 0.00 | 0.50 | 18.60 | 234.00 | 178.00 | 40.50 | 38.10 | 7.70 | 3.70 | 0.00 | 557.70 | 46.48 | 12 |
| 2008 | 0.00 | 3.00 | 0.00 | 17.30 | 12.00 | 43.00 | 176.60 | 282.30 | 88.20 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 622.40 | 51.87 | 12 |
| 2009 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.80 | 15.10 | 95.90 | 19.50 | 101.10 | 63.10 | 26.40 | 30.00 | 9.20 | 362.10 | 30.18 | 12 |
| 2010 | 35.90 | 97.00 | 0.00 | 0.80 | 7.50 | 58.40 | 128.60 | 34.10 | 83.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 446.10 | 37.18 | 12 |
| 2011 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.80 | 3.50 | 60.00 | 35.60 | 42.50 | 83.00 | 25.10 | 0.00 | 0.00 | 253.50 | 21.13 | 12 |
| 2012 | 9.00 | 50.20 | 0.40 | 0.00 | 4.20 | 46.70 | 169.50 | 38.10 | 90.00 | 3.50 | 0.20 | 8.70 | 420.50 | 35.04 | 12 |
| 2013 | 61.95 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 24.20 | 119.10 | 230.80 | 66.60 | 141.40 | 38.50 | 31.40 | 67.50 | 781.45 | 65.12 | 12 |
| MINIMA | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 3.00 | 19.50 | 13.50 | 6.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 253.50 | 21.13 | |
| MAXIM | 183.40 | 97.00 | 35.20 | 43.60 | 126.00 | 234.00 | 519.20 | 282.30 | 188.90 | 120.60 | 68.50 | 67.50 | 817.10 | 68.09 | |
| MEDIA | 18.80 | 10.27 | 2.95 | 7.30 | 22.99 | 76.81 | 122.32 | 100.61 | 84.05 | 32.37 | 9.99 | 9.48 | 497.94 | 41.50 | |
| . E. | 31.37 | 19.08 | 7.59 | 11.82 | 24.82 | 54.58 | 91.36 | 54.25 | 48.31 | 33.79 | 15.29 | 14.61 | 136.35 | 11.36 | |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.2.3. Volumen de escurrimiento medio anual.

1. Estaciones climatológicas que influyen en la cuenca

Como se determinó en el subcapítulo de Condiciones naturales de la cuenca- Climatología, las estaciones que influyen en la CE de estudio, por los polígonos de Thiessen, son la Aguascalientes II (1097) y la estación Cañada Honda (1004). Con una superficie de influencia de 12.10 km² (36%) y 6.7 km² (64%), respectivamente.

2. Estimación de datos faltantes

A partir de los registros de las precipitaciones medias mensuales de las estaciones Aguascalientes II (1097) y Cañada Honda (1004), ver anexos A-1 y A-2; proporcionados por la CONAGUA a través de la Coordinación General del Servicio Meteorológico Nacional, de la Dirección Aguascalientes; se calcularon los datos faltantes de ambas estaciones. Dado que la estación Aguascalientes II (1097) tiene un inicio de operaciones a partir del año 1995, también se estimaron los registros mensuales del periodo 1970-1994; esto con el fin de igualar el período de operación con el que cuenta la estación climatológica de Cañada Honda (1004), que cuenta con registros a partir del año 1970; y de esta manera predecir un escurrimiento medio anual a largo plazo con más exactitud.

Los resultados de las estimaciones de los datos faltantes de la estación Aguascalientes II (1097) del periodo 1970-2013, calculados a partir del método US National Weather Service, se observan en la tabla 22. Mientras que para la estación Cañada Honda (1004), se calcularon anteriormente para conocer la precipitación media de la CE y se pueden visualizar en la tabla 21.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 22. Datos faltantes de la estación Aguascalientes II (1097) para el periodo de 1970-2013. Por el método de US National Weather Service.

| ESTIMACIÓN DE DATOS FALTANTES | | | | | | | | | | | | | Elemento: Lluvia media mensual | | |
|-------------------------------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|---|--------|-------|-------|--------------------------------|-------|-------|
| ESTACIÓN: | AGS II | | | | 1097 | | | | NOTA: LOS DATOS FALTANTES ESTIMADOS ESTAN EN CELDAS ROJAS | | | | Σ | MEDIA | MESES |
| AÑO | E | F | M | A | M | J | J' | A' | S | O | N | D | | | |
| 1970 | N/A | N/A | 0.00 | 0.00 | 0.58 | 204.90 | 139.92 | 170.02 | 221.58 | 22.36 | 17.85 | 0.00 | 777.21 | 77.72 | 10 |
| 1971 | 4.46 | 0.00 | 0.47 | 0.00 | 45.69 | 192.18 | 79.80 | 180.17 | 226.70 | 27.85 | 0.00 | 0.15 | 757.47 | 63.12 | 12 |
| 1972 | 2.46 | 0.00 | 9.13 | 1.95 | 59.84 | 67.51 | 65.32 | 108.88 | 95.09 | 15.57 | 15.16 | 1.29 | 442.18 | 36.85 | 12 |
| 1973 | 20.03 | 11.53 | 0.00 | 0.33 | 27.34 | 90.63 | 127.47 | 220.19 | 29.01 | 83.61 | 0.58 | 0.00 | 610.72 | 50.89 | 12 |
| 1974 | 0.25 | 0.19 | 2.33 | 0.26 | 26.64 | 23.57 | 95.97 | 116.28 | 105.12 | 16.69 | 3.80 | 12.02 | 403.11 | 33.59 | 12 |
| 1975 | 28.61 | 0.07 | 0.00 | 0.82 | 14.89 | 78.10 | 166.85 | 126.37 | 18.85 | 1.96 | 0.00 | 14.12 | 450.63 | 37.55 | 12 |
| 1976 | 0.14 | 0.00 | 0.01 | 4.50 | 10.33 | 15.83 | 280.01 | 37.21 | 70.70 | 41.21 | 60.66 | 10.25 | 530.84 | 44.24 | 12 |
| 1977 | 2.89 | 0.00 | 0.00 | 4.69 | 0.62 | 62.95 | 70.67 | 201.41 | 66.60 | 42.08 | 4.05 | 4.87 | 460.81 | 38.40 | 12 |
| 1978 | 0.00 | 5.56 | 0.41 | 0.00 | 17.06 | 53.13 | 72.99 | 118.91 | 127.32 | 41.21 | 4.33 | 3.14 | 444.06 | 37.01 | 12 |
| 1979 | 0.26 | 10.62 | 0.83 | 0.00 | 1.06 | 7.45 | 92.69 | 110.58 | 33.19 | 0.00 | 0.00 | 43.60 | 300.28 | 25.02 | 12 |
| 1980 | 42.98 | 14.61 | 0.00 | 7.31 | 0.83 | 36.34 | 53.58 | 168.98 | 100.52 | 28.68 | 31.02 | 27.93 | 512.76 | 42.73 | 12 |
| 1981 | 47.07 | 14.05 | 3.08 | 29.92 | 7.08 | 92.28 | 66.79 | 102.06 | 22.12 | 22.59 | 3.84 | 5.98 | 416.87 | 34.74 | 12 |
| 1982 | 0.00 | 0.00 | 0.74 | 1.90 | 23.26 | 12.25 | 101.14 | 57.94 | 13.25 | 70.05 | 38.77 | 48.57 | 367.87 | 30.66 | 12 |
| 1983 | 23.35 | 0.00 | 0.36 | 0.21 | 35.81 | 58.58 | 174.36 | 89.01 | 80.90 | 17.29 | 11.21 | 0.00 | 491.09 | 40.92 | 12 |
| 1984 | 19.77 | 4.03 | 0.00 | 0.00 | 23.79 | 83.36 | 147.11 | 89.68 | 31.40 | 6.24 | 1.01 | 8.58 | 414.99 | 34.58 | 12 |
| 1985 | 1.78 | 0.32 | 0.24 | 5.67 | 12.85 | 107.52 | 90.01 | 123.37 | 36.67 | 45.63 | 2.20 | 32.41 | 458.67 | 38.22 | 12 |
| 1986 | 0.00 | 1.76 | 0.00 | 9.85 | 9.34 | 167.84 | 102.66 | 23.31 | 97.72 | 119.28 | 18.77 | 0.39 | 550.93 | 45.91 | 12 |
| 1987 | 22.85 | 29.91 | 0.00 | 18.57 | 46.44 | 31.48 | 175.87 | 42.90 | 51.37 | 0.00 | 0.00 | 1.80 | 421.18 | 35.10 | 12 |
| 1988 | 8.48 | 0.02 | 9.37 | 23.81 | 0.00 | 57.12 | 164.12 | 133.44 | 68.78 | 1.61 | 0.09 | 4.92 | 471.75 | 39.31 | 12 |
| 1989 | 0.04 | 2.39 | 0.00 | 0.32 | 24.31 | 53.94 | 42.00 | 142.45 | 96.86 | 8.66 | 14.94 | 41.14 | 427.04 | 35.59 | 12 |
| 1990 | 11.48 | 23.07 | 0.42 | 0.96 | 25.66 | 31.94 | 209.63 | 116.75 | 93.06 | 49.13 | 0.00 | 0.00 | 662.11 | 55.18 | 12 |
| 1991 | 0.00 | 6.13 | 0.00 | 0.00 | 0.55 | 38.72 | 398.71 | 75.73 | 91.95 | 36.50 | 0.35 | 18.84 | 667.48 | 55.62 | 12 |
| 1992 | 165.34 | 5.46 | 1.49 | 5.93 | 44.31 | 39.78 | 103.43 | 115.20 | 39.42 | 104.13 | 16.10 | 7.22 | 647.81 | 53.98 | 12 |
| 1993 | 25.40 | 0.02 | 0.00 | 2.16 | 8.28 | 101.72 | 94.06 | 57.64 | 51.53 | 25.04 | 1.08 | 0.00 | 366.92 | 30.58 | 12 |
| 1994 | 14.86 | 0.00 | 0.03 | 20.39 | 5.45 | 117.26 | 47.73 | 115.54 | 81.09 | 34.86 | 0.10 | 1.24 | 438.55 | 36.55 | 12 |
| 1995 | 3.50 | 2.86 | 0.00 | 0.13 | 30.99 | 66.54 | 121.60 | 165.30 | 99.90 | 2.30 | 7.80 | 6.30 | 507.22 | 42.27 | 12 |
| 1996 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 14.00 | 4.00 | 40.20 | 38.30 | 71.50 | 160.50 | 89.00 | 0.00 | 0.00 | 417.50 | 34.79 | 12 |
| 1997 | 0.00 | 18.00 | 9.00 | 50.00 | 10.30 | 88.00 | 59.00 | 29.50 | 33.50 | 20.00 | 26.50 | 0.00 | 343.80 | 28.65 | 12 |
| 1998 | 0.00 | 2.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 88.00 | 78.10 | 96.20 | 17.00 | 1.00 | 0.00 | 382.30 | 31.86 | 12 |
| 1999 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 77.00 | 107.50 | 132.00 | 107.70 | 4.70 | 0.00 | 0.00 | 428.90 | 35.74 | 12 |
| 2000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 61.50 | 123.00 | 75.50 | 54.50 | 43.70 | 12.50 | 0.00 | 34.00 | 404.70 | 33.73 | 12 |
| 2001 | 0.00 | 7.50 | 21.00 | 35.50 | 25.50 | 95.00 | 106.50 | 114.70 | 101.80 | 10.90 | 0.00 | 0.70 | 519.10 | 43.26 | 12 |
| 2002 | 34.00 | 21.10 | 0.00 | 10.00 | 35.70 | 62.00 | 145.40 | 79.00 | 152.00 | 66.00 | 40.00 | 0.00 | 645.20 | 53.77 | 12 |
| 2003 | 2.50 | 1.20 | 0.00 | 0.00 | 3.00 | 119.70 | 184.40 | 102.50 | 137.70 | 46.00 | 2.00 | 0.00 | 599.00 | 49.92 | 12 |
| 2004 | 39.40 | 1.00 | 26.50 | 0.00 | 45.50 | 247.70 | 131.80 | 84.70 | 110.80 | 21.50 | 0.00 | 0.00 | 708.90 | 59.08 | 12 |
| 2005 | 0.00 | 46.80 | 8.20 | 0.00 | 12.50 | 13.30 | 158.00 | 217.20 | 26.70 | 14.50 | 0.00 | 2.20 | 499.40 | 41.62 | 12 |
| 2006 | 2.90 | 9.30 | 0.00 | 0.00 | 58.70 | 55.60 | 134.30 | 126.90 | 66.50 | 129.00 | 28.50 | 10.00 | 621.70 | 51.81 | 12 |
| 2007 | 27.20 | 17.50 | 0.00 | 0.00 | 12.40 | 276.50 | 169.90 | 40.30 | 62.90 | 14.00 | 1.00 | 2.30 | 624.00 | 52.00 | 12 |
| 2008 | 0.00 | 20.00 | 0.00 | 9.00 | 2.50 | 72.70 | 203.10 | 352.70 | 91.00 | 1.20 | 0.00 | 0.00 | 752.20 | 62.68 | 12 |
| 2009 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 40.00 | 7.90 | 52.50 | 50.30 | 119.00 | 111.90 | 31.60 | 13.50 | 4.00 | 430.70 | 35.89 | 12 |
| 2010 | 46.20 | 109.10 | 0.00 | 0.00 | 7.50 | 61.60 | 159.70 | 90.20 | 68.62 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 542.92 | 45.24 | 12 |
| 2011 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 85.60 | 19.90 | 77.90 | 85.20 | 18.70 | 1.00 | 0.00 | 288.30 | 24.03 | 12 |
| 2012 | 9.70 | 53.40 | 0.00 | 0.00 | 7.20 | 96.00 | 150.50 | 77.36 | 110.15 | 6.14 | 0.56 | 10.97 | 521.99 | 43.50 | 12 |
| 2013 | 53.50 | 0.00 | 2.00 | 0.00 | 19.00 | 145.20 | 196.50 | 75.50 | 117.90 | 31.80 | 38.00 | 73.00 | 752.40 | 62.70 | 12 |
| MINIMA | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 7.45 | 19.90 | 23.31 | 13.25 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 288.30 | 24.03 | |
| MAXIMA | 165.34 | 109.10 | 26.50 | 50.00 | 61.50 | 276.50 | 398.71 | 352.70 | 226.70 | 129.00 | 60.66 | 73.00 | 777.21 | 77.72 | |
| MEDIA | 15.38 | 10.22 | 2.17 | 6.78 | 18.55 | 84.19 | 124.16 | 114.38 | 84.90 | 31.80 | 9.22 | 9.82 | 510.99 | 42.88 | |
| DESV | | | | | | | | | | | | | | | |
| . E. | 28.27 | 19.70 | 5.45 | 12.02 | 18.00 | 59.37 | 69.31 | 62.27 | 47.61 | 32.05 | 14.30 | 16.24 | 127.63 | 11.42 | |

Los datos faltantes en la tabla 22 se encuentran en celdas rojas, donde los registros de enero y febrero del año 1970 no se pudieron determinar por los métodos utilizados pero se considera que no son de mucha relevancia, dado a que son meses en los cuales casi nunca se rebasa su media mensual. Las medias mensuales se muestran en celdas azules.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3. Precipitación media de la cuenca

A partir del Método de Polígonos de Thiessen se calcularon las precipitaciones medias de la cuenca para cada mes, tomando en cuenta las consideraciones mostradas en la tabla 23.

Tabla 23. Consideraciones para el cálculo de la precipitación media. Método de P. de Thiessen.

| | | AGUASCALIENTES II | CAÑADA HONDA | TOTAL |
|-----------------------------|--------------------|--|--------------|-----------------|
| | | 1097 | 1004 | |
| Area de influencia | km ² | 12.10 | 6.70 | 18.81 |
| Productos (Pi) (Ai) | mm*km ² | 6,364.44 | 3,337.92 | 9,702.36 |
| Precipitación media mensual | mm | $\bar{p} = \sum_{i=1}^n (A_i/A) * p_i = (12.1/18.808) * p_1 + (6.70/18.808) * p_2$ | | |

El resultado de la precipitación media de la cuenca para cada mes (celdas naranjas), el acumulado y la media (celda azul) para cada año, se observan en la tabla 24.

Tabla 24. Precipitación media mensual para cada registro por Método de Polígonos de Thiessen.

| PRECIPITACIÓN MEDIA DE LA CUENCA (mm) P=Σ(Ai/A)Pi | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------------------|--------|-------|-------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|-------|---|--|
| ESTACIÓN: | AGS II y CAÑADA HONDA | | | | 1097 y 1004 | | | | | | | | | | NOTA: LA PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL EN LA CUENCA ESTA EN CELDA VERDE | |
| AÑO | E | F | M | A | M' | J | J' | A' | S | O | N | D | Σ | MEDIA | MESES | |
| 1970 | N/A | N/A | 0.00 | 0.00 | 2.16 | 182.51 | 135.67 | 152.55 | 200.24 | 20.63 | 18.79 | 0.00 | 712.55 | 71.26 | 10 | |
| 1971 | 4.37 | 0.00 | 1.73 | 0.00 | 52.93 | 192.65 | 67.15 | 157.73 | 213.23 | 23.95 | 0.00 | 0.56 | 714.29 | 59.52 | 12 | |
| 1972 | 3.68 | 0.00 | 14.08 | 3.57 | 83.42 | 78.20 | 71.44 | 96.98 | 93.45 | 17.50 | 13.32 | 1.54 | 477.18 | 39.77 | 12 | |
| 1973 | 23.58 | 10.98 | 0.00 | 0.21 | 20.09 | 90.05 | 127.48 | 212.11 | 25.62 | 96.80 | 0.37 | 0.00 | 607.29 | 50.61 | 12 | |
| 1974 | 0.98 | 0.73 | 3.71 | 0.95 | 21.13 | 18.30 | 101.47 | 110.97 | 101.62 | 14.62 | 4.05 | 13.98 | 392.52 | 32.71 | 12 | |
| 1975 | 25.93 | 0.26 | 0.00 | 3.20 | 14.29 | 81.34 | 164.58 | 132.33 | 14.42 | 2.26 | 0.00 | 12.90 | 451.51 | 37.63 | 12 | |
| 1976 | 0.55 | 0.00 | 0.04 | 4.11 | 7.50 | 18.78 | 301.57 | 28.76 | 68.20 | 46.51 | 63.46 | 12.59 | 552.07 | 46.01 | 12 | |
| 1977 | 2.39 | 0.00 | 0.00 | 3.23 | 1.08 | 68.21 | 79.45 | 173.39 | 60.08 | 38.95 | 4.57 | 4.92 | 436.25 | 36.35 | 12 | |
| 1978 | 0.00 | 5.36 | 0.27 | 0.00 | 17.39 | 54.40 | 96.77 | 127.96 | 130.17 | 59.71 | 4.14 | 3.66 | 499.82 | 41.65 | 12 | |
| 1979 | 0.17 | 9.97 | 0.53 | 0.00 | 4.57 | 11.28 | 78.26 | 117.75 | 52.87 | 0.00 | 0.00 | 28.59 | 303.99 | 25.33 | 12 | |
| 1980 | 44.70 | 14.92 | 0.00 | 9.16 | 0.53 | 26.95 | 48.92 | 168.67 | 87.50 | 33.43 | 27.62 | 27.95 | 490.36 | 40.86 | 12 | |
| 1981 | 53.25 | 20.45 | 2.70 | 32.09 | 12.75 | 70.44 | 70.93 | 87.42 | 29.92 | 18.64 | 11.03 | 3.85 | 413.46 | 34.46 | 12 | |
| 1982 | 0.00 | 0.00 | 0.59 | 3.00 | 19.07 | 8.95 | 97.88 | 67.37 | 17.76 | 67.68 | 39.03 | 45.63 | 366.96 | 30.58 | 12 | |
| 1983 | 25.01 | 0.00 | 0.23 | 0.14 | 34.81 | 60.30 | 195.30 | 100.02 | 84.15 | 20.11 | 11.67 | 0.00 | 531.72 | 44.31 | 12 | |
| 1984 | 22.63 | 4.09 | 0.00 | 0.00 | 25.40 | 88.83 | 155.31 | 93.96 | 34.07 | 8.22 | 0.65 | 7.66 | 440.83 | 36.74 | 12 | |
| 1985 | 3.39 | 0.56 | 0.16 | 16.23 | 14.47 | 106.02 | 71.58 | 117.78 | 34.61 | 41.59 | 1.42 | 28.95 | 436.76 | 36.40 | 12 | |
| 1986 | 0.00 | 4.06 | 0.00 | 7.51 | 7.79 | 180.66 | 82.40 | 26.94 | 112.15 | 107.38 | 19.53 | 0.32 | 548.74 | 45.73 | 12 | |
| 1987 | 30.99 | 37.07 | 0.00 | 17.37 | 49.35 | 44.96 | 162.37 | 43.36 | 51.59 | 0.00 | 0.00 | 1.58 | 438.65 | 36.55 | 12 | |
| 1988 | 13.73 | 0.08 | 8.45 | 24.20 | 0.00 | 57.04 | 154.53 | 115.53 | 77.59 | 2.28 | 0.45 | 3.98 | 457.87 | 38.16 | 12 | |
| 1989 | 0.21 | 1.61 | 0.00 | 0.21 | 22.28 | 41.13 | 46.92 | 132.92 | 81.08 | 5.64 | 16.13 | 41.27 | 389.39 | 32.45 | 12 | |
| 1990 | 11.88 | 25.15 | 0.27 | 0.91 | 26.75 | 32.43 | 207.41 | 209.11 | 88.44 | 58.49 | 0.00 | 0.00 | 660.82 | 55.07 | 12 | |
| 1991 | 0.00 | 6.15 | 0.00 | 0.00 | 1.07 | 55.32 | 441.66 | 62.32 | 108.79 | 29.62 | 0.37 | 15.51 | 720.81 | 60.07 | 12 | |
| 1992 | 171.77 | 4.69 | 1.31 | 10.23 | 41.24 | 35.37 | 120.38 | 103.33 | 34.39 | 98.46 | 16.78 | 7.04 | 644.99 | 53.75 | 12 | |
| 1993 | 26.08 | 0.08 | 0.00 | 2.28 | 12.42 | 115.72 | 102.06 | 53.71 | 46.32 | 19.93 | 0.91 | 0.00 | 379.50 | 31.62 | 12 | |
| 1994 | 13.02 | 0.00 | 0.12 | 22.50 | 10.60 | 113.57 | 45.04 | 97.42 | 81.70 | 35.16 | 0.07 | 0.90 | 420.10 | 35.01 | 12 | |
| 1995 | 3.43 | 2.80 | 0.00 | 0.08 | 28.39 | 58.33 | 112.51 | 189.14 | 102.61 | 1.48 | 7.76 | 12.04 | 518.58 | 43.22 | 12 | |
| 1996 | 0.00 | 0.53 | 0.00 | 14.96 | 4.57 | 37.81 | 35.41 | 80.66 | 141.82 | 96.09 | 0.18 | 0.00 | 412.05 | 34.34 | 12 | |
| 1997 | 13.26 | 18.71 | 10.53 | 47.72 | 13.08 | 82.23 | 58.64 | 47.36 | 30.51 | 24.60 | 26.68 | 8.27 | 381.58 | 31.80 | 12 | |
| 1998 | 0.00 | 1.89 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 91.41 | 74.03 | 81.59 | 127.67 | 25.70 | 0.71 | 0.00 | 403.01 | 33.58 | 12 | |
| 1999 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.43 | 63.24 | 116.98 | 129.43 | 91.06 | 3.27 | 0.00 | 0.00 | 405.41 | 33.78 | 12 | |
| 2000 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 62.50 | 121.11 | 67.09 | 58.71 | 31.33 | 14.25 | 0.18 | 35.10 | 390.27 | 32.52 | 12 | |
| 2001 | 0.86 | 4.93 | 22.89 | 34.79 | 23.11 | 76.25 | 94.17 | 108.39 | 114.60 | 9.97 | 0.14 | 6.40 | 496.50 | 41.38 | 12 | |
| 2002 | 38.70 | 22.42 | 0.00 | 6.44 | 33.13 | 78.89 | 169.35 | 90.16 | 144.69 | 76.48 | 42.57 | 0.00 | 702.83 | 58.57 | 12 | |
| 2003 | 3.18 | 1.27 | 0.00 | 0.00 | 16.54 | 111.89 | 179.09 | 107.45 | 150.92 | 51.24 | 1.39 | 0.00 | 622.99 | 51.92 | 12 | |
| 2004 | 39.19 | 1.53 | 29.60 | 0.29 | 58.94 | 226.56 | 121.82 | 85.38 | 109.41 | 15.76 | 0.04 | 0.00 | 688.51 | 57.38 | 12 | |
| 2005 | 0.00 | 46.27 | 9.13 | 0.00 | 19.38 | 19.61 | 121.50 | 184.91 | 32.12 | 9.69 | 0.29 | 2.27 | 445.15 | 37.10 | 12 | |
| 2006 | 3.36 | 6.16 | 0.00 | 0.86 | 55.03 | 45.26 | 111.28 | 111.57 | 89.28 | 109.33 | 25.47 | 10.61 | 568.20 | 47.35 | 12 | |
| 2007 | 25.31 | 16.50 | 0.00 | 0.18 | 14.61 | 261.35 | 172.79 | 40.37 | 54.06 | 11.75 | 1.96 | 1.48 | 600.37 | 50.03 | 12 | |
| 2008 | 0.00 | 13.94 | 0.00 | 11.96 | 5.89 | 62.11 | 193.65 | 327.61 | 90.00 | 0.77 | 0.00 | 0.00 | 705.94 | 58.83 | 12 | |
| 2009 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 26.38 | 10.47 | 67.97 | 39.32 | 112.62 | 94.51 | 29.75 | 19.38 | 5.85 | 406.25 | 33.85 | 12 | |
| 2010 | 42.53 | 104.79 | 0.00 | 0.29 | 7.50 | 60.46 | 148.62 | 70.20 | 74.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 508.41 | 42.37 | 12 | |
| 2011 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1.35 | 1.25 | 76.48 | 25.50 | 65.28 | 84.42 | 20.98 | 0.64 | 0.00 | 275.90 | 22.99 | 12 | |
| 2012 | 9.45 | 52.26 | 0.14 | 0.00 | 6.13 | 78.43 | 157.27 | 63.37 | 102.97 | 5.20 | 0.43 | 10.16 | 485.81 | 40.48 | 12 | |
| 2013 | 56.51 | 0.00 | 1.29 | 0.00 | 20.85 | 135.90 | 208.73 | 72.33 | 126.28 | 34.19 | 35.65 | 71.04 | 762.75 | 63.56 | 12 | |
| MINIMA | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 8.95 | 25.50 | 26.94 | 14.42 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 275.90 | 22.99 | | |
| MAXIM. | 171.77 | 104.79 | 29.60 | 47.72 | 83.42 | 261.35 | 441.66 | 327.61 | 213.23 | 109.33 | 63.46 | 71.04 | 762.75 | 71.26 | | |
| MEDIA | 16.61 | 10.24 | 2.45 | 6.96 | 20.13 | 81.56 | 123.51 | 109.48 | 84.60 | 32.00 | 9.50 | 9.70 | 506.11 | 42.45 | | |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

4. Método del coeficiente de escurrimiento anual. Coeficiente de escurrimiento

4.1. Coberturas y usos de suelo en la cuenca

Las coberturas y usos de suelo se conocieron a partir de la información vectorial proporcionada por INEGI (s/f-d), estas coberturas se muestran en la figura 38.

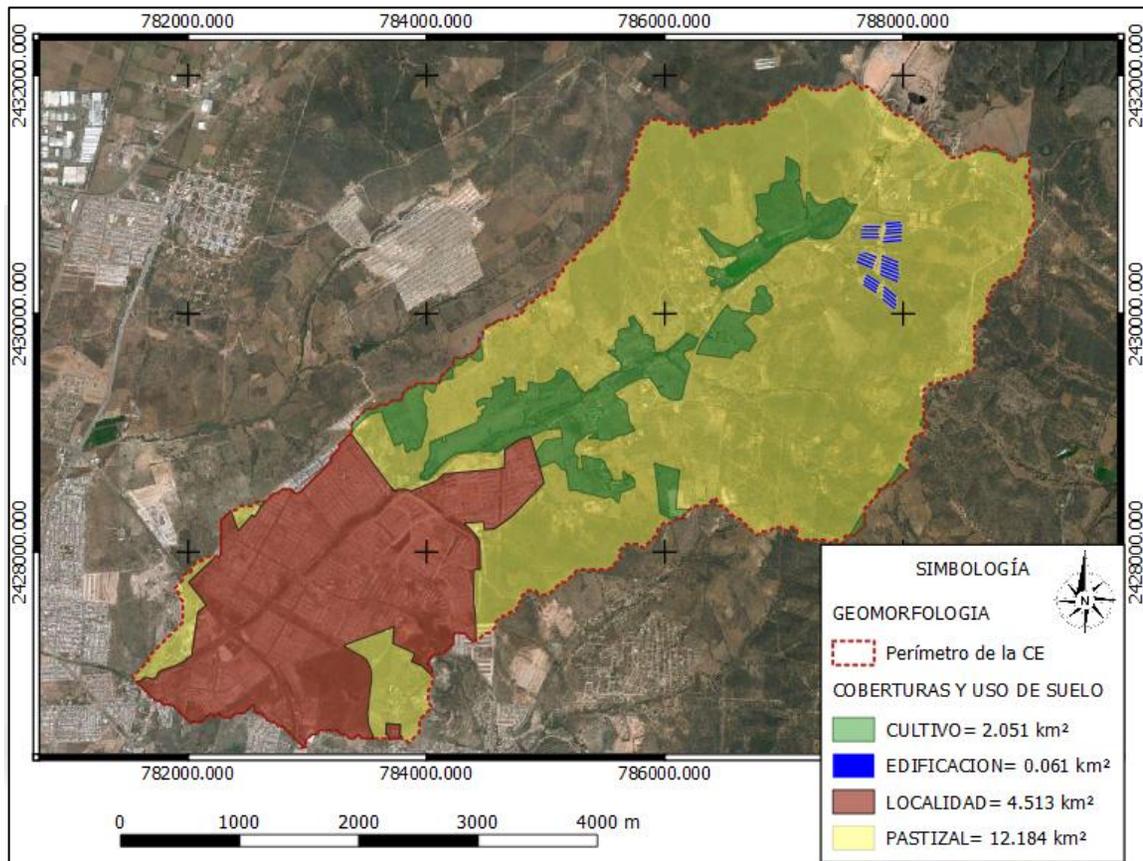


Figura 38. Coberturas y usos de suelo en la CE. Elaborado a partir de la información proporcionada por INEGI (s/f-d).

En la CE se encontraron coberturas de cultivo con 2.051 km², edificación con 0.061 km², localidad con 4.513 km² y pastizal en su mayoría con 12.184 km².

4.2. Determinación del parámetro K

Para la determinación del parámetro K fue necesario conocer primero a qué tipo de suelo pertenece la CE. En este caso resulto ser un tipo B, pues según su textura es un suelo con moderadas velocidades de infiltración. El tipo de textura que caracterizo el tipo de suelo se obtuvo a partir de la información vectorial proporcionada por el INEGI (2013). En la figura 39 se muestra la textura a la que pertenece la cuenca.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

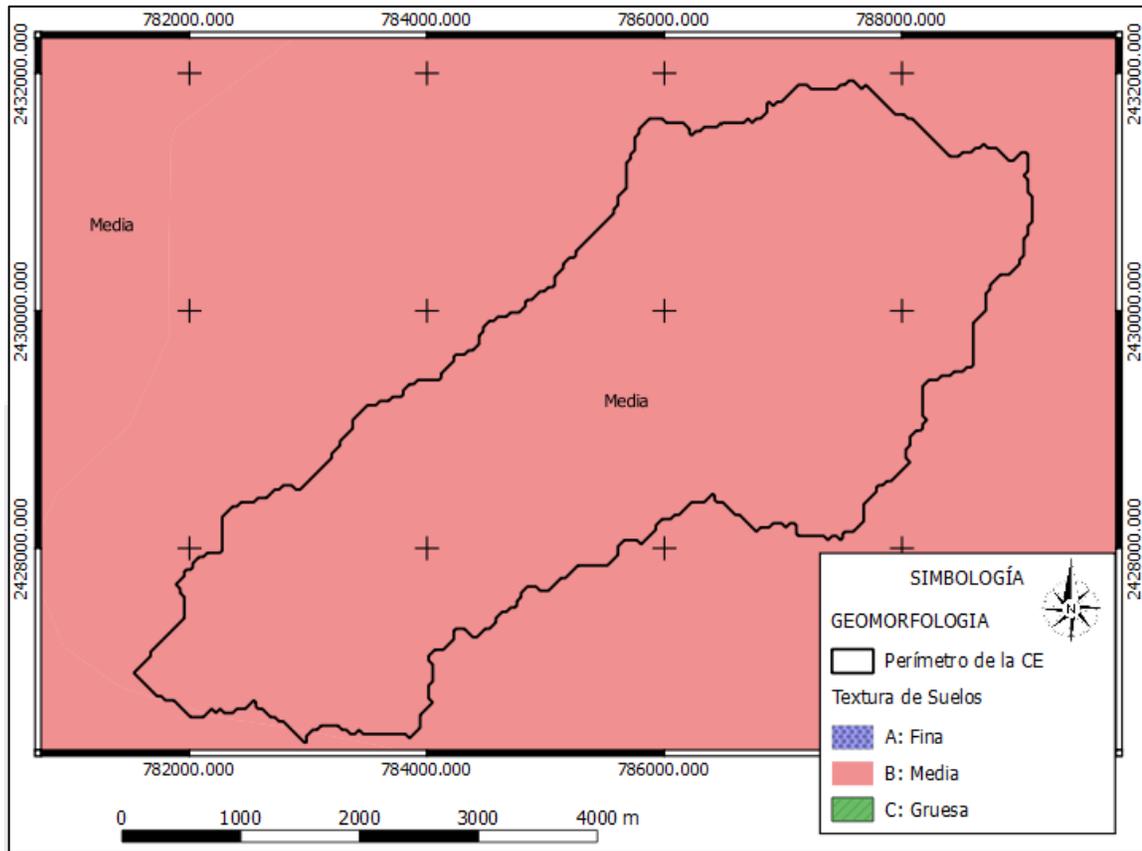


Figura 39. Texturas que clasifican el tipo de suelo en la cuenca. Elaborado a partir de información proporcionada por INEGI (2013).

El parámetro K para cada cubierta de suelo se determinó a partir de la tabla 6. Mientras que el parámetro K total de la CE se calculó a partir del promedio ponderado de los parámetros de cada cubierta de suelo respecto al área total, obteniendo un valor para la cuenca de 0.23. En la tabla 25 se muestra el resumen para la obtención del valor.

Tabla 25. Determinación del parámetro K en la CE.

| DETERMINACION DEL PARÁMETRO K | | | | | |
|-------------------------------|----------------------|-------------|---------------|------|-------------|
| CUBIERTA DEL SUELO | AREA km ² | % AREA | TIPO DE SUELO | K | K* (% AREA) |
| CULTIVO | 2.05 | 10.9% | B | 0.27 | 0.03 |
| EDIFICACION | 0.06 | 0.3% | B | 0.29 | 0.00 |
| LOCALIDAD | 4.51 | 24.0% | B | 0.29 | 0.07 |
| PASTIZAL | 12.18 | 64.8% | B | 0.2 | 0.13 |
| TOTAL | 18.81 | 100% | | | 0.23 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

4.3. Coeficiente de escurrimiento (C)

Ya que el valor de K es igual 0.23, el coeficiente de escurrimiento para cada año se calculó con la siguiente ecuación:

$$C_i = k \frac{P_i - 250}{2000} + \frac{k - 0.15}{1.5}; \text{ si } k > 0.15$$

Los coeficientes de escurrimiento para cada año (amarillo) se visualizan en la siguiente tabla:

Tabla 26. Coeficientes de escurrimientos anuales de la CE.

| Coeficiente de escurrimiento para cada año | | | | | |
|--|---------|----------|------|---------|----------|
| AÑO | ΣP (mm) | C (adim) | AÑO | ΣP (mm) | C (adim) |
| 1970 | 712.55 | 0.106 | 1992 | 644.99 | 0.098 |
| 1971 | 714.29 | 0.106 | 1993 | 379.50 | 0.068 |
| 1972 | 477.18 | 0.079 | 1994 | 420.10 | 0.073 |
| 1973 | 607.29 | 0.094 | 1995 | 518.58 | 0.084 |
| 1974 | 392.52 | 0.069 | 1996 | 412.05 | 0.072 |
| 1975 | 451.51 | 0.076 | 1997 | 381.58 | 0.068 |
| 1976 | 552.07 | 0.088 | 1998 | 403.01 | 0.071 |
| 1977 | 436.25 | 0.074 | 1999 | 405.41 | 0.071 |
| 1978 | 499.82 | 0.082 | 2000 | 390.27 | 0.069 |
| 1979 | 303.99 | 0.059 | 2001 | 496.50 | 0.081 |
| 1980 | 490.36 | 0.081 | 2002 | 702.83 | 0.105 |
| 1981 | 413.46 | 0.072 | 2003 | 622.99 | 0.096 |
| 1982 | 366.96 | 0.066 | 2004 | 688.51 | 0.103 |
| 1983 | 531.72 | 0.085 | 2005 | 445.15 | 0.075 |
| 1984 | 440.83 | 0.075 | 2006 | 568.20 | 0.090 |
| 1985 | 436.76 | 0.074 | 2007 | 600.37 | 0.093 |
| 1986 | 548.74 | 0.087 | 2008 | 705.94 | 0.105 |
| 1987 | 438.65 | 0.075 | 2009 | 406.25 | 0.071 |
| 1988 | 457.87 | 0.077 | 2010 | 508.41 | 0.083 |
| 1989 | 389.39 | 0.069 | 2011 | 275.90 | 0.056 |
| 1990 | 660.82 | 0.100 | 2012 | 485.81 | 0.080 |

5. Método del coeficiente de escurrimiento anual. Lámina de escurrimiento anual

La lámina de escurrimiento de cada año se estimó a partir de la siguiente ecuación:

$$E'_i = C_i * P_i$$

En donde:

E'_i : Lámina de escurrimiento para cada año

C_i : Coeficiente de escurrimiento para cada año

P_i : Precipitación acumulada para cada año

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

En la tabla 27 se muestran los valores de las láminas de escurrimientos anuales (amarillo) calculadas:

Tabla 27. Lámina de escurrimiento anual de la CE.

| Lámina de escurrimiento | | | | | | | |
|-------------------------|----------|----------|---------|------|----------|----------|---------|
| AÑO | Σ P (mm) | C (adim) | E' (mm) | AÑO | Σ P (mm) | C (adim) | E' (mm) |
| 1970 | 712.55 | 0.106 | 75.60 | 1992 | 644.99 | 0.098 | 63.43 |
| 1971 | 714.29 | 0.106 | 75.92 | 1993 | 379.50 | 0.068 | 25.76 |
| 1972 | 477.18 | 0.079 | 37.74 | 1994 | 420.10 | 0.073 | 30.47 |
| 1973 | 607.29 | 0.094 | 57.09 | 1995 | 518.58 | 0.084 | 43.48 |
| 1974 | 392.52 | 0.069 | 27.23 | 1996 | 412.05 | 0.072 | 29.51 |
| 1975 | 451.51 | 0.076 | 34.38 | 1997 | 381.58 | 0.068 | 25.99 |
| 1976 | 552.07 | 0.088 | 48.40 | 1998 | 403.01 | 0.071 | 28.44 |
| 1977 | 436.25 | 0.074 | 32.45 | 1999 | 405.41 | 0.071 | 28.72 |
| 1978 | 499.82 | 0.082 | 40.83 | 2000 | 390.27 | 0.069 | 26.97 |
| 1979 | 303.99 | 0.059 | 18.00 | 2001 | 496.50 | 0.081 | 40.37 |
| 1980 | 490.36 | 0.081 | 39.52 | 2002 | 702.83 | 0.105 | 73.78 |
| 1981 | 413.46 | 0.072 | 29.67 | 2003 | 622.99 | 0.096 | 59.69 |
| 1982 | 366.96 | 0.066 | 24.38 | 2004 | 688.51 | 0.103 | 71.15 |
| 1983 | 531.72 | 0.085 | 45.38 | 2005 | 445.15 | 0.075 | 33.57 |
| 1984 | 440.83 | 0.075 | 33.02 | 2006 | 568.20 | 0.090 | 50.87 |
| 1985 | 436.76 | 0.074 | 32.51 | 2007 | 600.37 | 0.093 | 55.97 |
| 1986 | 548.74 | 0.087 | 47.90 | 2008 | 705.94 | 0.105 | 74.36 |
| 1987 | 438.65 | 0.075 | 32.75 | 2009 | 406.25 | 0.071 | 28.82 |
| 1988 | 457.87 | 0.077 | 35.20 | 2010 | 508.41 | 0.083 | 42.03 |
| 1989 | 389.39 | 0.069 | 26.87 | 2011 | 275.90 | 0.056 | 15.45 |
| 1990 | 660.82 | 0.100 | 66.19 | 2012 | 485.81 | 0.080 | 38.90 |
| 1991 | 720.81 | 0.107 | 77.16 | 2013 | 762.75 | 0.112 | 85.32 |

6. Método del coeficiente de escurrimiento anual. Volumen de escurrimiento anual

El volumen de escurrimiento anual se calculó a partir de la siguiente ecuación.

$$Ve_i = E'_i * A$$

En donde:

Ve_i : Volumen de escurrimiento de cada año

E'_i : Lámina de escurrimiento de cada año

A: Área de la cuenca= 18'807,752.659 m²

En la tabla 28 se muestran los valores de los volúmenes de escurrimientos para cada año (amarillo) y el medio anual (rojo). Donde el medio anual es el usado para

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

determinar los volúmenes de infiltración a través de la Falla oriente, así como para dimensionar el embalse que regule los escurrimientos

Tabla 28. Volúmenes de escurrimiento para cada año y el medio anual de la CE.

| Volumen escurrimiento anual | | | | | |
|-----------------------------|---------|----------------------|------|----------------|----------------------|
| Área de la cuenca= | | 18,808,254.00 | | m ² | |
| AÑO | E' (mm) | Ve (m ³) | AÑO | E' (mm) | Ve (m ³) |
| 1970 | 75.6 | 1,421,862.17 | 1992 | 63.43 | 1,192,984.91 |
| 1971 | 75.92 | 1,427,997.81 | 1993 | 25.76 | 484,457.76 |
| 1972 | 37.74 | 709,780.26 | 1994 | 30.47 | 573,114.45 |
| 1973 | 57.09 | 1,073,853.73 | 1995 | 43.48 | 817,695.22 |
| 1974 | 27.23 | 512,112.89 | 1996 | 29.51 | 554,960.46 |
| 1975 | 34.38 | 646,564.51 | 1997 | 25.99 | 488,834.36 |
| 1976 | 48.4 | 910,397.21 | 1998 | 28.44 | 534,923.84 |
| 1977 | 32.45 | 610,348.50 | 1999 | 28.72 | 540,218.81 |
| 1978 | 40.83 | 767,866.79 | 2000 | 26.97 | 507,276.00 |
| 1979 | 18 | 338,529.38 | 2001 | 40.37 | 759,218.25 |
| 1980 | 39.52 | 743,310.80 | 2002 | 73.78 | 1,387,727.50 |
| 1981 | 29.67 | 558,126.42 | 2003 | 59.69 | 1,122,707.43 |
| 1982 | 24.38 | 458,514.81 | 2004 | 71.15 | 1,338,172.58 |
| 1983 | 45.38 | 853,494.44 | 2005 | 33.57 | 631,359.07 |
| 1984 | 33.02 | 621,119.95 | 2006 | 50.87 | 956,787.35 |
| 1985 | 32.51 | 611,538.96 | 2007 | 55.97 | 1,052,638.99 |
| 1986 | 47.9 | 900,973.92 | 2008 | 74.36 | 1,398,586.73 |
| 1987 | 32.75 | 615,974.85 | 2009 | 28.82 | 542,069.55 |
| 1988 | 35.2 | 661,962.38 | 2010 | 42.03 | 790,495.96 |
| 1989 | 26.87 | 505,394.83 | 2011 | 15.45 | 290,510.55 |
| 1990 | 66.19 | 1,244,857.89 | 2012 | 38.9 | 731,666.26 |
| 1991 | 77.16 | 1,451,183.50 | 2013 | 85.32 | 1,604,679.12 |
| $\overline{Ve} =$ | | 816,973.89 | = | | 0.817 |
| | | m ³ | | | hm ³ |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

7. Método relación lluvia-escurrimiento. Meses que producen escurrimiento

Los meses que producen escurrimiento según el método relación lluvia-escurrimiento, son los mostrados en la tabla 29, en ella se muestran los valores de las precipitaciones medias para cada mes, calculados por el método de polígonos de Thiessen, y solo se consideran los que superan la media mensual del respectivo año (ver tabla 24).

Tabla 29. Precipitaciones medias mensuales de cada registro que rebasan la media mensual de su respectivo año. Por el método de relación lluvia-escurrimiento.

| ESTIMACIÓN DE ESCURRIMIENTO MENSUAL POR MÉTODO DE LA RELACIÓN LLUVIA -ESCURRIMIENTO | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------|--------|---|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|
| MESES QUE TIENEN MAYOR PRECIPITACIÓN QUE LA MEDIA MENSUAL (SE SUPONE QUE PRODUCEN ESCURRIMIENTO) | | | | | | | | | | | | | |
| AÑO | E | F | M | A | M' | J | J' | A' | S | O | N | D | Σ |
| 1970 | N/A | N/A | * | * | * | 182.51 | 135.67 | 152.55 | 200.24 | * | * | * | 670.97 |
| 1971 | * | * | * | * | * | 192.65 | 67.15 | 157.73 | 213.23 | * | * | * | 630.75 |
| 1972 | * | * | * | * | 83.42 | 78.20 | 71.44 | 96.98 | 93.45 | * | * | * | 423.49 |
| 1973 | * | * | * | * | * | 90.05 | 127.48 | 212.11 | * | 96.80 | * | * | 526.43 |
| 1974 | * | * | * | * | * | * | 101.47 | 110.97 | 101.62 | * | * | * | 314.06 |
| 1975 | * | * | * | * | * | 81.34 | 164.58 | 132.33 | * | * | * | * | 378.26 |
| 1976 | * | * | * | * | * | * | 301.57 | * | 68.20 | 46.51 | 63.46 | * | 479.74 |
| 1977 | * | * | * | * | * | 68.21 | 79.45 | 173.39 | 60.08 | 38.95 | * | * | 420.07 |
| 1978 | * | * | * | * | * | 54.40 | 96.77 | 127.96 | 130.17 | 59.71 | * | * | 469.00 |
| 1979 | * | * | * | * | * | * | 78.26 | 117.75 | 52.87 | * | * | 28.59 | 277.47 |
| 1980 | 44.70 | * | * | * | * | * | 48.92 | 168.67 | 87.50 | * | * | * | 349.78 |
| 1981 | 53.25 | * | * | * | * | 70.44 | 70.93 | 87.42 | * | * | * | * | 282.04 |
| 1982 | * | * | * | * | * | * | 97.88 | 67.37 | * | 67.68 | 39.03 | 45.63 | 317.59 |
| 1983 | * | * | * | * | * | 60.30 | 195.30 | 100.02 | 84.15 | * | * | * | 439.76 |
| 1984 | * | * | * | * | * | 88.83 | 155.31 | 93.96 | * | * | * | * | 338.10 |
| 1985 | * | * | * | * | * | 106.02 | 71.58 | 117.78 | * | 41.59 | * | * | 336.97 |
| 1986 | * | * | * | * | * | 180.66 | 82.40 | * | 112.15 | 107.38 | * | * | 482.59 |
| 1987 | * | 37.07 | * | * | 49.35 | 44.96 | 162.37 | 43.36 | 51.59 | * | * | * | 388.71 |
| 1988 | * | * | * | * | * | 57.04 | 154.53 | 115.53 | 77.59 | * | * | * | 404.69 |
| 1989 | * | * | * | * | * | 41.13 | 46.92 | 132.92 | 81.08 | * | * | 41.27 | 343.31 |
| 1990 | * | * | * | * | * | * | 207.41 | 209.11 | 88.44 | 58.49 | * | * | 563.45 |
| 1991 | * | * | * | * | * | * | 441.66 | 62.32 | 108.79 | * | * | * | 612.76 |
| 1992 | 171.77 | * | * | * | * | * | 120.38 | 103.33 | * | 98.46 | * | * | 493.94 |
| 1993 | * | * | * | * | * | 115.72 | 102.06 | 53.71 | 46.32 | * | * | * | 317.80 |
| 1994 | * | * | * | * | * | 113.57 | 45.04 | 97.42 | 81.70 | 35.16 | * | * | 372.89 |
| 1995 | * | * | * | * | * | 58.33 | 112.51 | 189.14 | 102.61 | * | * | * | 462.60 |
| 1996 | * | * | * | * | * | 37.81 | 35.41 | 80.66 | 141.82 | 96.09 | * | * | 391.80 |
| 1997 | * | * | * | 47.72 | * | 82.23 | 58.64 | 47.36 | * | * | * | * | 235.95 |
| 1998 | * | * | * | * | * | 91.41 | 74.03 | 81.59 | 127.67 | * | * | * | 374.70 |
| 1999 | * | * | * | * | * | 63.24 | 116.98 | 129.43 | 91.06 | * | * | * | 400.71 |
| 2000 | * | * | * | * | 62.50 | 121.11 | 67.09 | 58.71 | * | * | * | 35.10 | 344.51 |
| 2001 | * | * | * | * | * | 76.25 | 94.17 | 108.39 | 114.60 | * | * | * | 393.41 |
| 2002 | * | * | * | * | * | 78.89 | 169.35 | 90.16 | 144.69 | 76.48 | * | * | 559.57 |
| 2003 | * | * | * | * | * | 111.89 | 179.09 | 107.45 | 150.92 | * | * | * | 549.36 |
| 2004 | * | * | * | * | 58.94 | 226.56 | 121.82 | 85.38 | 109.41 | * | * | * | 602.11 |
| 2005 | * | 46.27 | * | * | * | * | 121.50 | 184.91 | * | * | * | * | 352.68 |
| 2006 | * | * | * | * | 55.03 | * | 111.28 | 111.57 | 89.28 | 109.33 | * | * | 476.48 |
| 2007 | * | * | * | * | * | 261.35 | 172.79 | * | 54.06 | * | * | * | 488.20 |
| 2008 | * | * | * | * | * | 62.11 | 193.65 | 327.61 | 90.00 | * | * | * | 673.38 |
| 2009 | * | * | * | * | * | 67.97 | 39.32 | 112.62 | 94.51 | * | * | * | 314.42 |
| 2010 | 42.53 | 104.79 | * | * | * | 60.46 | 148.62 | 70.20 | 74.03 | * | * | * | 500.63 |
| 2011 | * | * | * | * | * | 76.48 | 25.50 | 65.28 | 84.42 | * | * | * | 251.67 |
| 2012 | * | 52.26 | * | * | * | 78.43 | 157.27 | 63.37 | 102.97 | * | * | * | 454.29 |

Las ponderaciones de cada registro respecto a la media total de cada año (tabla 29), se muestran en la tabla 30.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 30 Porcentajes de las precipitaciones medias mensuales de cada registro que rebasan la media mensual de su respectivo año. Por el método de relación lluvia-escurrimiento.

| ESTIMACIÓN DE ESCURRIMIENTO MENSUAL POR MÉTODO DE LA RELACIÓN LLUVIA -ESCURRIMIENTO | | | | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| % DE ESCURRIMIENTO | | | | | | | | | | | | | |
| AÑO | E | F | M | A | M' | J | J' | A' | S | O | N | D | Σ |
| 1970 | N/A | N/A | * | * | * | 27% | 20% | 23% | 30% | * | * | * | 100% |
| 1971 | * | * | * | * | * | 31% | 11% | 25% | 34% | * | * | * | 100% |
| 1972 | * | * | * | * | 20% | 18% | 17% | 23% | 22% | * | * | * | 100% |
| 1973 | * | * | * | * | * | 17% | 24% | 40% | * | 18% | * | * | 100% |
| 1974 | * | * | * | * | * | * | 32% | 35% | 32% | * | * | * | 100% |
| 1975 | * | * | * | * | * | 22% | 44% | 35% | * | * | * | * | 100% |
| 1976 | * | * | * | * | * | * | 63% | * | 14% | 10% | 13% | * | 100% |
| 1977 | * | * | * | * | * | 16% | 19% | 41% | 14% | 9% | * | * | 100% |
| 1978 | * | * | * | * | * | 12% | 21% | 27% | 28% | 13% | * | * | 100% |
| 1979 | * | * | * | * | * | * | 28% | 42% | 19% | * | * | 10% | 100% |
| 1980 | 13% | * | * | * | * | * | 14% | 48% | 25% | * | * | * | 100% |
| 1981 | 19% | * | * | * | * | 25% | 25% | 31% | * | * | * | * | 100% |
| 1982 | * | * | * | * | * | * | 31% | 21% | * | 21% | 12% | 14% | 100% |
| 1983 | * | * | * | * | * | 14% | 44% | 23% | 19% | * | * | * | 100% |
| 1984 | * | * | * | * | * | 26% | 46% | 28% | * | * | * | * | 100% |
| 1985 | * | * | * | * | * | 31% | 21% | 35% | * | 12% | * | * | 100% |
| 1986 | * | * | * | * | * | 37% | 17% | * | 23% | 22% | * | * | 100% |
| 1987 | * | 10% | * | * | 13% | 12% | 42% | 11% | 13% | * | * | * | 100% |
| 1988 | * | * | * | * | * | 14% | 38% | 29% | 19% | * | * | * | 100% |
| 1989 | * | * | * | * | * | 12% | 14% | 39% | 24% | * | * | 12% | 100% |
| 1990 | * | * | * | * | * | * | 37% | 37% | 16% | 10% | * | * | 100% |
| 1991 | * | * | * | * | * | * | 72% | 10% | 18% | * | * | * | 100% |
| 1992 | 35% | * | * | * | * | * | 24% | 21% | * | 20% | * | * | 100% |
| 1993 | * | * | * | * | * | 36% | 32% | 17% | 15% | * | * | * | 100% |
| 1994 | * | * | * | * | * | 30% | 12% | 26% | 22% | 9% | * | * | 100% |
| 1995 | * | * | * | * | * | 13% | 24% | 41% | 22% | * | * | * | 100% |
| 1996 | * | * | * | * | * | 10% | 9% | 21% | 36% | 25% | * | * | 100% |
| 1997 | * | * | * | 20% | * | 35% | 25% | 20% | * | * | * | * | 100% |
| 1998 | * | * | * | * | * | 24% | 20% | 22% | 34% | * | * | * | 100% |
| 1999 | * | * | * | * | * | 16% | 29% | 32% | 23% | * | * | * | 100% |
| 2000 | * | * | * | * | 18% | 35% | 19% | 17% | * | * | * | 10% | 100% |
| 2001 | * | * | * | * | * | 19% | 24% | 28% | 29% | * | * | * | 100% |
| 2002 | * | * | * | * | * | 14% | 30% | 16% | 26% | 14% | * | * | 100% |
| 2003 | * | * | * | * | * | 20% | 33% | 20% | 27% | * | * | * | 100% |
| 2004 | * | * | * | * | 10% | 38% | 20% | 14% | 18% | * | * | * | 100% |
| 2005 | * | 13% | * | * | * | * | 34% | 52% | * | * | * | * | 100% |
| 2006 | * | * | * | * | 12% | * | 23% | 23% | 19% | 23% | * | * | 100% |
| 2007 | * | * | * | * | * | 54% | 35% | * | 11% | * | * | * | 100% |
| 2008 | * | * | * | * | * | 9% | 29% | 49% | 13% | * | * | * | 100% |
| 2009 | * | * | * | * | * | 22% | 13% | 36% | 30% | * | * | * | 100% |
| 2010 | 8% | 21% | * | * | * | 12% | 30% | 14% | 15% | * | * | * | 100% |
| 2011 | * | * | * | * | * | 30% | 10% | 26% | 34% | * | * | * | 100% |
| 2012 | * | 12% | * | * | * | 17% | 35% | 14% | 23% | * | * | * | 100% |
| 2013 | * | * | * | * | * | 22% | 34% | 12% | 21% | * | * | 12% | 100% |

A partir de que se conocieron los volúmenes de escurrimiento anuales (tabla 28), se procedió determinar su distribución en los meses que generaron escurrimiento, para ello se multiplicó cada volumen de escurrimiento anual por los porcentajes respectivos

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

a cada mes que produce escurrimiento, estos porcentajes se observan en la tabla 30. El resultado de la distribución mensual de los escurrimientos se muestra en la tabla 31.

Tabla 31. Volúmenes de escurrimiento mensuales.

| AÑO | Ve ANUAL (m ³) | VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO MENSUAL (m ³) | | | | | | | | | | | |
|--------|-------------------------------|---|------------|----------|-----------|------------|------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | $Ve = E' * A$ | $Ve_i = Ve * (\% \text{ de escurrimiento mensual})$ | | | | | | | | | | | |
| | | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC |
| 1970 | 1,421,862.17 | #¡VALOR! | #¡VALOR! | 0 | 0 | 0 | 386,766.45 | 287,506.85 | 323,262.80 | 424,326.07 | 0 | 0 | 0 |
| 1971 | 1,427,997.80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 436,145.68 | 152,024.76 | 357,088.40 | 482,738.97 | 0 | 0 | 0 |
| 1972 | 709,780.26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 139,813.18 | 131,060.75 | 119,737.28 | 162,541.77 | 156,627.27 | 0 | 0 | 0 |
| 1973 | 1,073,853.73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 183,687.45 | 260,047.96 | 432,668.02 | 0 | 197,450.31 | 0 | 0 |
| 1974 | 512,112.89 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 165,452.98 | 180,955.10 | 165,704.81 | 0 | 0 | 0 |
| 1975 | 646,564.51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 139,038.52 | 281,327.66 | 226,198.34 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1976 | 910,397.21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 572,277.69 | 0 | 129,429.08 | 88,269.97 | 120,420.48 | 0 |
| 1977 | 610,348.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 99,101.28 | 115,435.17 | 251,929.16 | 87,292.76 | 56,590.13 | 0 | 0 |
| 1978 | 767,866.79 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 89,071.90 | 158,429.83 | 209,499.48 | 213,112.18 | 97,753.39 | 0 | 0 |
| 1979 | 338,529.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 95,482.60 | 143,660.48 | 64,501.49 | 0 | 0 | 34,884.81 |
| 1980 | 743,310.80 | 94,991.61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103,948.94 | 358,424.36 | 185,945.90 | 0 | 0 | 0 |
| 1981 | 558,126.42 | 105,369.37 | 0 | 0 | 0 | 0 | 139,386.37 | 140,365.99 | 173,004.69 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1982 | 458,514.81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 141,314.37 | 97,268.44 | 0 | 97,707.81 | 56,353.00 | 65,871.20 |
| 1983 | 853,494.44 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 117,025.27 | 379,034.78 | 194,123.26 | 163,311.13 | 0 | 0 | 0 |
| 1984 | 621,119.95 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 163,187.30 | 285,312.49 | 172,620.17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1985 | 611,538.96 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 192,400.82 | 129,902.14 | 213,755.31 | 0 | 75,480.68 | 0 | 0 |
| 1986 | 900,973.92 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 337,281.42 | 153,831.84 | 0 | 209,381.36 | 200,479.30 | 0 | 0 |
| 1987 | 615,974.85 | 0 | 58,740.20 | 0 | 0 | 78,203.53 | 71,249.98 | 257,308.45 | 68,711.76 | 81,760.92 | 0 | 0 | 0 |
| 1988 | 661,962.38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 93,304.04 | 252,762.22 | 188,982.65 | 126,913.46 | 0 | 0 | 0 |
| 1989 | 505,394.83 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60,545.51 | 69,068.46 | 195,667.21 | 119,364.83 | 0 | 0 | 60,748.82 |
| 1990 | 1,244,857.89 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 458,238.10 | 461,991.02 | 195,401.28 | 129,227.49 | 0 | 0 |
| 1991 | 1,451,183.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,045,957.22 | 147,580.67 | 257,645.61 | 0 | 0 | 0 |
| 1992 | 1,192,984.91 | 414,873.87 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 290,754.95 | 249,563.43 | 0 | 237,792.66 | 0 | 0 |
| 1993 | 484,457.76 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 176,407.61 | 155,576.60 | 81,869.39 | 70,604.16 | 0 | 0 | 0 |
| 1994 | 573,114.45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 174,544.26 | 69,231.57 | 149,733.70 | 125,569.75 | 54,035.16 | 0 | 0 |
| 1995 | 817,695.22 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 103,104.95 | 198,881.12 | 334,335.65 | 181,373.50 | 0 | 0 | 0 |
| 1996 | 554,960.46 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 53,558.17 | 50,160.17 | 114,249.40 | 200,883.81 | 136,108.90 | 0 | 0 |
| 1997 | 488,834.36 | 0 | 0 | 0 | 98,864.75 | 0 | 170,357.07 | 121,498.61 | 98,113.93 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1998 | 534,923.84 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 130,496.75 | 105,682.46 | 116,481.44 | 182,263.19 | 0 | 0 | 0 |
| 1999 | 540,218.81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85,259.89 | 157,707.20 | 174,495.79 | 122,755.93 | 0 | 0 | 0 |
| 2000 | 507,276.00 | 0 | 0 | 0 | 0 | 92,026.04 | 178,331.63 | 98,785.50 | 86,442.10 | 0 | 0 | 0 | 51,690.71 |
| 2001 | 759,218.25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 147,156.02 | 181,730.35 | 209,179.54 | 221,152.33 | 0 | 0 | 0 |
| 2002 | 1,387,727.50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 195,655.54 | 419,986.70 | 223,584.20 | 358,835.93 | 189,665.12 | 0 | 0 |
| 2003 | 1,122,707.43 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 228,674.23 | 365,997.82 | 219,599.87 | 308,435.51 | 0 | 0 | 0 |
| 2004 | 1,338,172.57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 130,985.96 | 503,534.05 | 270,742.73 | 189,748.78 | 243,161.06 | 0 | 0 | 0 |
| 2005 | 631,359.07 | 0 | 82,823.90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 217,513.38 | 331,021.80 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2006 | 956,787.35 | 0 | 0 | 0 | 0 | 110,500.01 | 0 | 223,445.04 | 224,044.68 | 179,267.59 | 219,530.03 | 0 | 0 |
| 2007 | 1,052,638.99 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 563,518.08 | 372,556.92 | 0 | 116,563.99 | 0 | 0 | 0 |
| 2008 | 1,398,586.73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 129,009.51 | 402,214.79 | 680,431.23 | 186,931.20 | 0 | 0 | 0 |
| 2009 | 542,069.55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 117,180.61 | 67,793.36 | 194,161.84 | 162,933.74 | 0 | 0 | 0 |
| 2010 | 790,495.96 | 67,153.70 | 165,460.62 | 0 | 0 | 0 | 95,466.30 | 234,665.72 | 110,854.58 | 116,895.03 | 0 | 0 | 0 |
| 2011 | 290,510.55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 88,278.24 | 29,430.53 | 75,357.95 | 97,443.83 | 0 | 0 | 0 |
| 2012 | 731,666.26 | 0 | 84,166.83 | 0 | 0 | 0 | 126,313.72 | 253,295.37 | 102,054.17 | 165,836.18 | 0 | 0 | 0 |
| 2013 | 1,604,679.12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 355,012.11 | 545,263.52 | 188,945.89 | 329,876.89 | 0 | 0 | 185,580.71 |
| MINIMA | 290,510.55 | 67,153.70 | 58,740.20 | - | 98,864.75 | 78,203.53 | 53,558.17 | 29,430.53 | 68,711.76 | 64,501.49 | 54,035.16 | 56,353.00 | 34,884.81 |
| MAXIMA | 1,604,679.12 | 414,873.87 | 165,460.62 | - | 98,864.75 | 139,813.18 | 563,518.08 | 1,045,957.22 | 680,431.23 | 482,738.97 | 237,792.66 | 120,420.48 | 185,580.71 |
| MEDIA | 816,973.89 | 170,597.14 | 97,797.89 | #¡DIV/0! | 98,864.75 | 110,305.74 | 184,150.34 | 237,674.60 | 212,541.52 | 189,242.37 | 136,930.07 | 88,386.74 | 79,755.25 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.3. Implementación de métodos geofísicos

3.3.1. Selección del punto en la Falla Oriente dentro de la zona de estudio

Los estudios de resistividad y de refracción sísmica se realizaron en un punto sobre la Falla oriente atraviesa el área de estudio, donde sus coordenadas UTM son: 13 Q 781563.238,2427064.618. Así mismo, en tal punto la discontinuidad geológica presenta una abertura horizontal aproximada de 0.50 m entre el techo y muro; con una profundidad sin azolves de 3.00 metros, ver figuras 40 y 41. El tendido y colocación de los electrodos y geófonos fue de manera perpendicular a la trayectoria de la discontinuidad geológica como se muestra en la figura 42.



Figura 40. Discontinuidad geológica en el punto donde se trabajaron los estudios geofísicos.

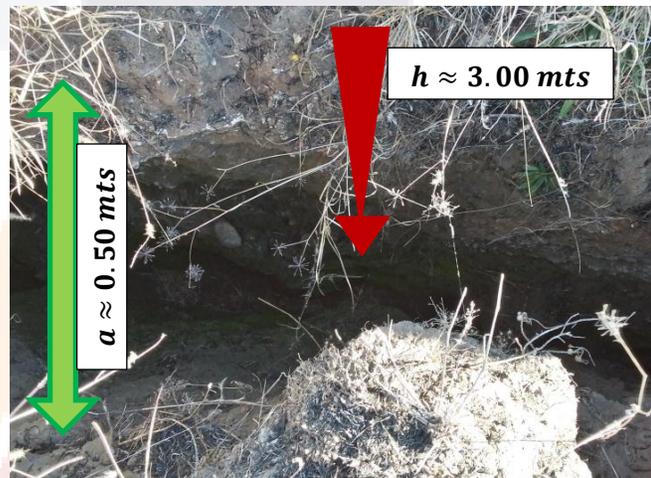


Figura 41. Abertura aproximada entre Techo y piso, y la profundidad aproximada sin azolves de la discontinuidad en el punto de estudio.

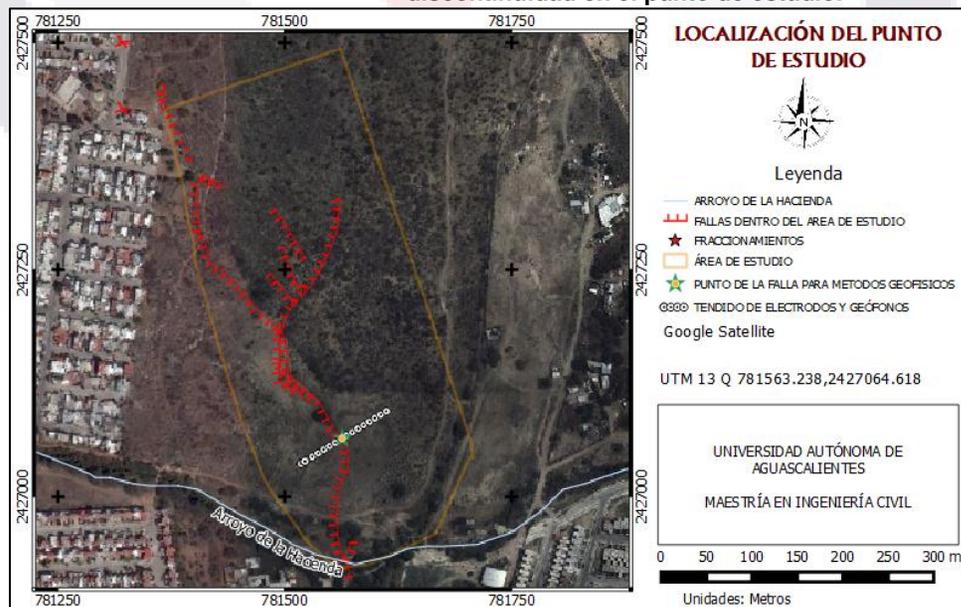


Figura 42. Localización del punto de estudio, en el cual se desarrollaron los métodos geofísicos

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3.3.2. Sondeo eléctrico continuo (CVES) con arreglo Dipolo-Dipolo

El CVES se realizó con una serie de 24 electrodos, los cuales fueron colocados a 5 metros de separación entre cada y de manera alineada, con una orientación del tendido NE-SO; visualizar la figura 43.

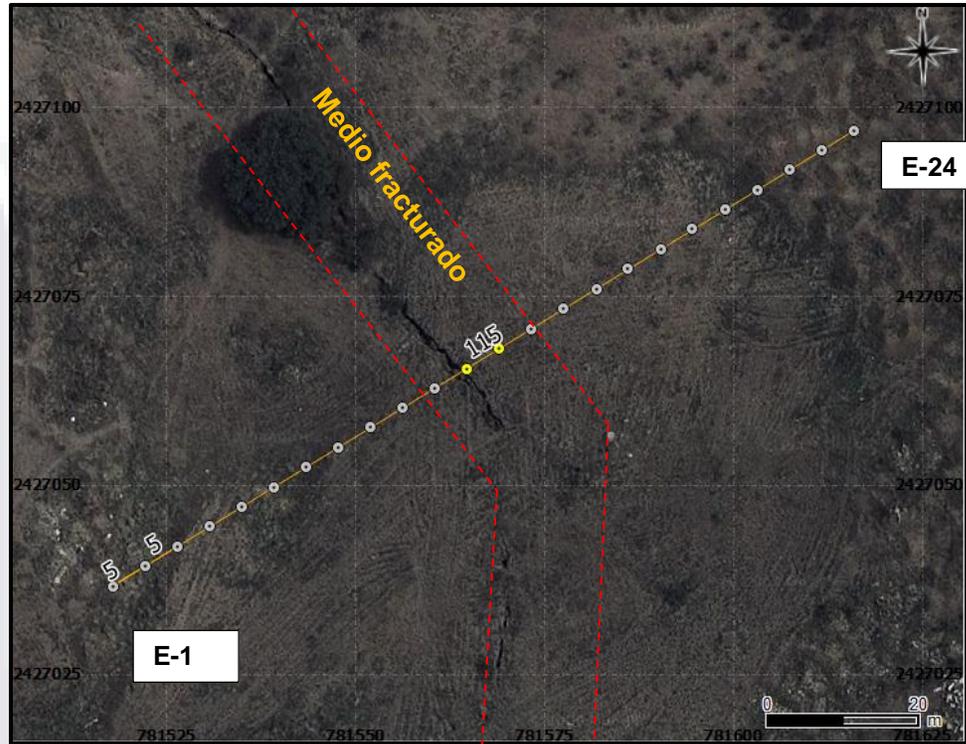


Figura 43. Tendido de Electrodo de manera ortogonal a la discontinuidad geológica.

Las coordenadas aproximadas de los electrodos 1 y 24 se muestran en la tabla 31.

Tabla 32. Coordenadas geográficas de los electrodos (1 y 24) y geófonos (1 y 24)

| | Coordenadas UTM | Huso y banda | Metros al oeste | Metros al norte |
|------|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| E-1 | 13Q 781518 2427037 | 13 Q | 781517.799 | 2427036.537 |
| E-24 | 13Q 781616 2427097 | 13 Q | 781615.996 | 2427096.783 |

El resistivímetro IRIS-SYSCAL se ubicó en las coordenadas UTM 13 Q 781563.238 2427064.618, que es el punto donde queda el centro del tendido de los electrodos y a su vez la discontinuidad geológica, en este caso los electrodos que quedan en el centro del tendido son los 11 y 13; observar las figuras 44 y 45. Como se mencionó anteriormente, el equipo IRIS-SYSCAL se configuró para un arreglo dipolo-dipolo y fue el encargado de activar o desactivar los electrodos de corriente y de potencial de

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

manera automática, logrando así todas las configuraciones posibles y con ello obtener las resistividades aparentes del terreno.



Figura 44. Resistivímetro IRIS-SYSCAL conectado a una fuente de corriente continua y al tendido de cables.



Figura 45. Electrodo conectado al tendido del cableado.

A partir de lo anterior se procedió a realizar diferentes sondeos para conocer el comportamiento de las resistividades al vaciar 10,000 litros agua potable en la discontinuidad (figuras 46 y 47). Estos sondeos se realizaron antes, durante y después del vaciado del agua potable. Donde los primeros cuatro sondeos se realizaron el mismo día (Sondeos R-1, R-2, R-3 y R-4) y el resto en días posteriores, observar tabla 32.



Figura 46. Vaciado de agua potable en el punto de pruebas.



Figura 47. Lámina de agua que se presenta al vaciar un gasto.

Con el fin de representar los perfiles en el área de estudio, en la figura 48 se muestra el perfil bidimensional de un sondeo eléctrico, colocación de los electrodos, y los bloques de techo y muro.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 33. Descripción de los sondeos eléctricos

| Sondeo | Fecha | Descripción | Observaciones |
|--------|------------|---|--|
| R-1 | 23-01-2016 | Antes del vertido del agua en la discontinuidad geológica. | |
| R-2 | 23-01-2016 | Inmediatamente después del vaciado de 5000 litros del vertido de agua en la discontinuidad. | |
| R-3 | 23-01-2016 | Inmediatamente después del vaciado de 10,000 litros del vertido de agua en la discontinuidad. | En este punto se tomaron los gastos en diferentes tiempos y también las láminas en el punto de descarga. |
| R-4 | 23-01-2016 | Tres horas después del vaciado. | |
| R-5 | 24-01-2016 | Un día después del vaciado. | |
| R-6 | 25-01-2016 | Dos días después del vaciado. | |
| R-7 | 27-01-2016 | Cuatro días después del vaciado. | |

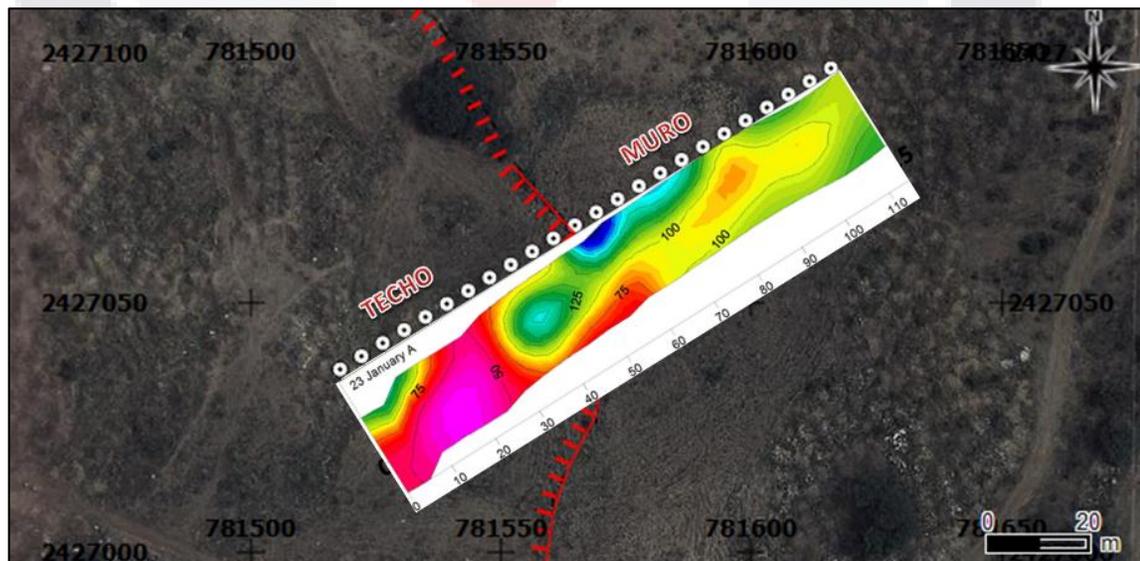


Figura 48. Representación de perfil 2D de CVES en zona de estudio.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Análisis de la velocidad de infiltración.

Para el estimar el gasto medio de vaciado de 5,000 litros de una pipa hacia la discontinuidad se tomaron 5 medidas. Al mismo tiempo se fueron tomando las láminas que se presentadas en el punto de descarga. Los datos obtenidos se pueden visualizar en la tabla 33.

Tabla 34. Gasto medio del vaciado y lámina máxima creada con ese gasto.

| Tiempo | Volumen | Gasto | Lámina |
|----------|---------|---------------|--------|
| Segundos | Litros | l/s | Metros |
| 2.50 | 19 | 7.6000 | 0.55 |
| 2.81 | 19 | 6.7616 | 0.60 |
| 2.90 | 19 | 6.5517 | 0.70 |
| 3.00 | 19 | 6.3333 | 0.75 |
| 5.00 | 19 | 3.8000 | 0.80 |
| | | 6.2093 | |

Dado que en campo el comportamiento del esparcimiento del agua fue a lo largo de la discontinuidad y no de manera puntual. Se detectó que cuando se vaciaron 5,000 litros, el esparcimiento del agua fue aproximadamente de 10 metros al sur y 10 metros al norte sobre la línea de falla. Mientras que la lámina máxima que se presentó fue de 0.80 metros en el punto de vaciado; por lo que se consideró un comportamiento triangular, como se muestra en la figura 49.

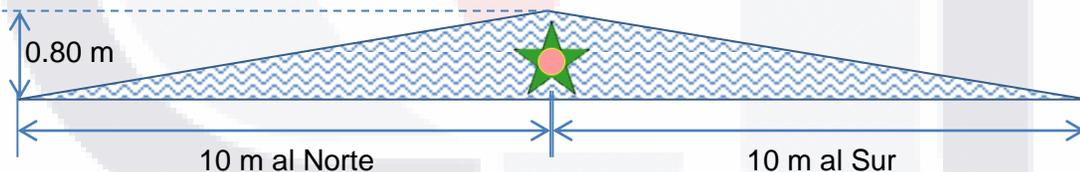


Figura 49. Consideración del comportamiento del agua al vaciarse directamente en la discontinuidad.

Esta fracción de 20 metros en la falla cuenta con una profundidad sin azolves de 3 m y de 0.50 m de separación en la superficie; considerando una sección transversal triangular, como se muestra en la figura 50.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

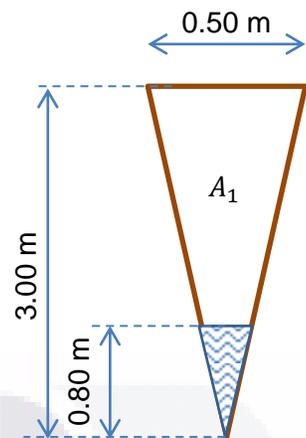


Figura 50. Consideración a la sección transversal de la discontinuidad.

Por lo tanto, el área de la sección transversal para la discontinuidad sin azolves, es de :

$$A_1 = \frac{0.50 * 3.00}{2} = 0.75 \text{ m}^2$$

El área de la sección inundada:

$$A_2 = \frac{0.133 * 0.80}{2} = 0.053 \text{ m}^2$$

El volumen de esparcimiento del agua a lo largo de la discontinuidad es de:

$$Vol = \frac{0.053 \text{ m}^2 * 20 \text{ m}}{2} = 0.53 \text{ m}^3$$

El tiempo de vaciado de esos 0.53 m³ fue de 4 minutos a 0.80 m de tirante en punto de descarga. Entonces la velocidad de infiltración en esa sección es de:

$$v = \frac{0.80 \text{ m}}{(60 \text{ seg} * 4 \text{ min})} = 0.0033 \text{ m/seg} = 3.333 \text{ mm/seg}$$

Esta velocidad podría variar según la geometría de la sección de la falla, el contenido de azolves, su carga hidráulica, las heterogeneidades intrínsecas del suelo, etcétera. Para este caso se consideró constante la velocidad de infiltración, ya que solo se tomó en cuenta el tiempo que tardó en vaciarse un cierto volumen de agua. Pero a partir de las observaciones hechas en campo, se notó que con de los caudales vertidos (tabla 33), el comportamiento del agua era el trasladarse a lo largo de la falla creando un leve incremento en la lámina del punto de vaciado; lo que podría indicar que la demanda de agua es menor al caudal que fue vertido o que disminuye la velocidad de infiltración.

Y el gasto que demanda la discontinuidad es de:

$$Q = \frac{0.53 \text{ m}^3}{(60 \text{ seg} * 4 \text{ min})} = 0.0022 \text{ m}^3/\text{seg} = 0.1325 \text{ m}^3/\text{min} = 190.80 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$Q = 69,642 \text{ m}^3/\text{año}$$

Es decir, el volumen en 20 metros a lo largo de la discontinuidad es de 0.53 m³, los cuales se vacían o son infiltrados en 4 minutos, por lo que genera un gasto de 0.1325 m³/min.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Perfiles de resistividad en 2D

En la tabla 34 se muestran los perfiles obtenidos a partir de la inversión y procesamiento de los valores obtenidos en campo. En ésta tabla 34 también se puede observar la casi nula variación de las resistividades aparentes en el medio, donde es importante notar que éstas variaciones se presentan entre los 50-80 metros del tendido superficial y que es donde se encuentran la abertura de la discontinuidad geológica, presentándose las mayores resistividades de los perfiles.



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 35. Perfiles de resistividades de los sondeos.

| S | Perfil de resistividad | Observaciones |
|-----|--|---|
| R-1 | | Antes del vaciado, en condiciones relativamente secas. |
| R-2 | | Después de 5,000 lt. Este perfil muestra unas resistencias muy discutibles en la superficie por lecturas que salen de la configuración de los otros perfiles. |
| R-3 | | Después de 10,000 lt. Las resistividades bajan en los puntos marcados. |
| R-4 | | 3 horas después. Las resistividades no "varían" con respecto al sondeo R-3. |
| R-5 | | 1 día después. Las resistividades no presentan mucha variación aunque si hay una ligera disminución en la superficie y un ligero aumento a 5 metros de profundidad. |
| R-6 | | 2 días después. Las resistividades no presentan mucha variación aunque si hay un ligero aumento respecto a R-5. |
| R-7 | <p style="text-align: center;">Ro (ohm-m)</p> <p style="text-align: center;">25 75 125 175 225 275 325 375</p> | 4 días después. Las resistividades no presentan mucha variación aunque si hay un ligero aumento respecto a R-6. Mientras que en la superficie existió una ligera disminución. |

Es importante notar que existen muy pequeñas o nulas variaciones en las resistividades por metro para cada perfil, lo cual puede indicar que el agua se desplaza en su mayoría a lo largo de la discontinuidad. También es muy interesante notar el

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

cambio entre dos suelos, uno con bajas resistividades por metro como 25 y el otro con un aumento hasta de 175 Ω -m.

3.3.3. Método sísmico de refracción

Con el fin de corroborar la configuración estratigráfica del suelo se emplea el método de refracción sísmica, el cual se realizó al igual que con el sondeo eléctrico con una serie de 24 geófonos, siendo el mismo tendido y colocación de los geófonos que el de los electrodos en el del sondeo eléctrico. Es decir, se colocaron cada uno de los geófonos de manera alineada en orientación NE-SO a 5 metros de separación entre sí, como se puede visualizar en la figura 51.

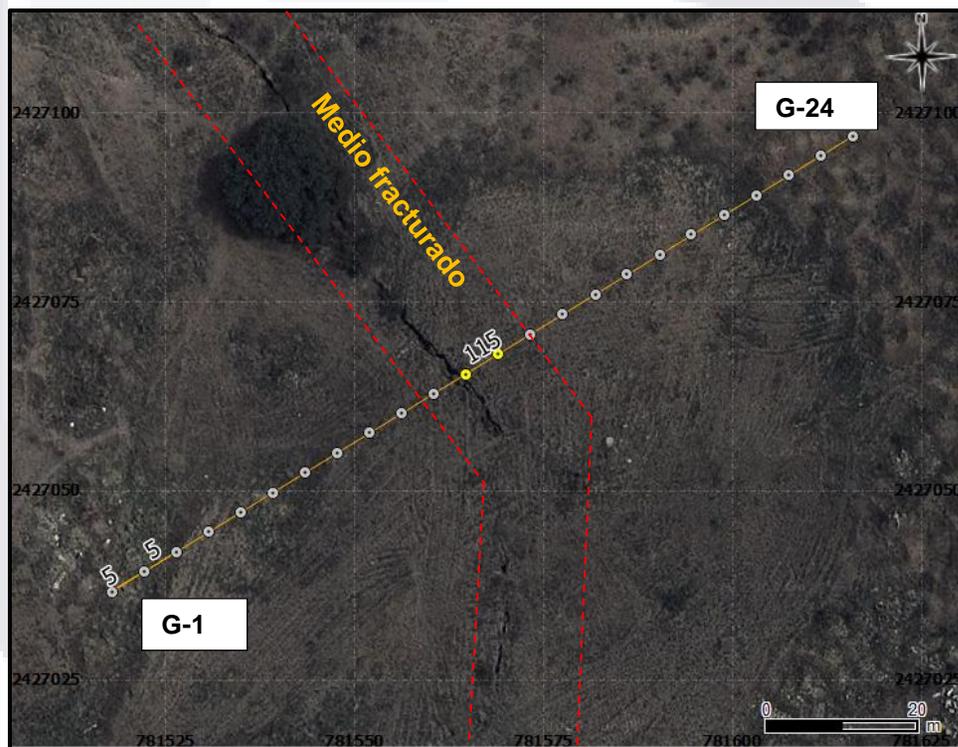


Figura 51. Tendido de Geófonos de manera ortogonal a la discontinuidad geológica.

Las coordenadas aproximadas de los geofonos 1 y 24 se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 36. Coordenadas geográficas de los geófonos 1 y 24.

| | Coordenadas UTM | Huso y banda | Metros al oeste | Metros al norte |
|------|--------------------|--------------|-----------------|-----------------|
| G-1 | 13Q 781518 2427037 | 13 Q | 781517.799 | 2427036.537 |
| G-24 | 13Q 781616 2427097 | 13 Q | 781615.996 | 2427096.783 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Las velocidades de las ondas P fueron producidas por el golpeo con marro sobre una placa entre cada par de electrodos. Las velocidades de las ondas producidas, se captaron con el equipo GEOMETRICS de 24 canales, mientras que el procesamiento de los datos obtenidos se hizo con la ayuda del programa computacional Rayfract.

La representación del perfil bidimensional de las velocidades de las ondas P en el área de estudio se muestra en la figura 52.

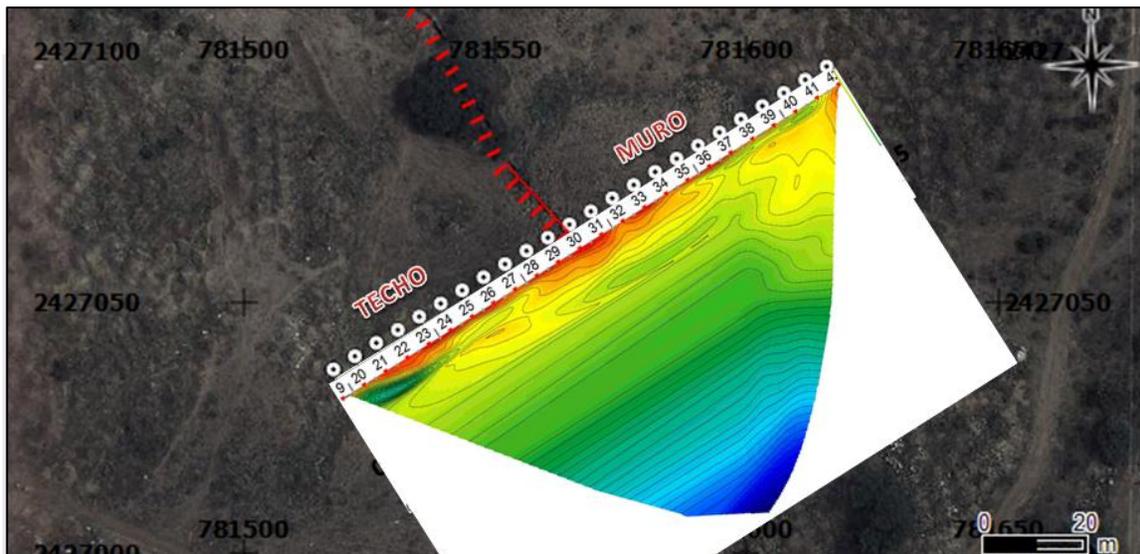


Figura 52. Representación de perfil 2D de refracción sísmica en zona de estudio

En el perfil de las velocidades de las ondas P se muestra una variación de forma ascendente según la profundidad aumenta. En la zona de la discontinuidad es donde se muestran las menores velocidades de onda P, y se justifica porque existe una abertura y el suelo es poco litificado o consolidado, que impide la expansión de las ondas. A partir de lo anterior y con lo mostrado en la figura 53 se puede decir que el material altamente consolidado o posiblemente basamento se encuentra a una profundidad a partir de 40 m.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

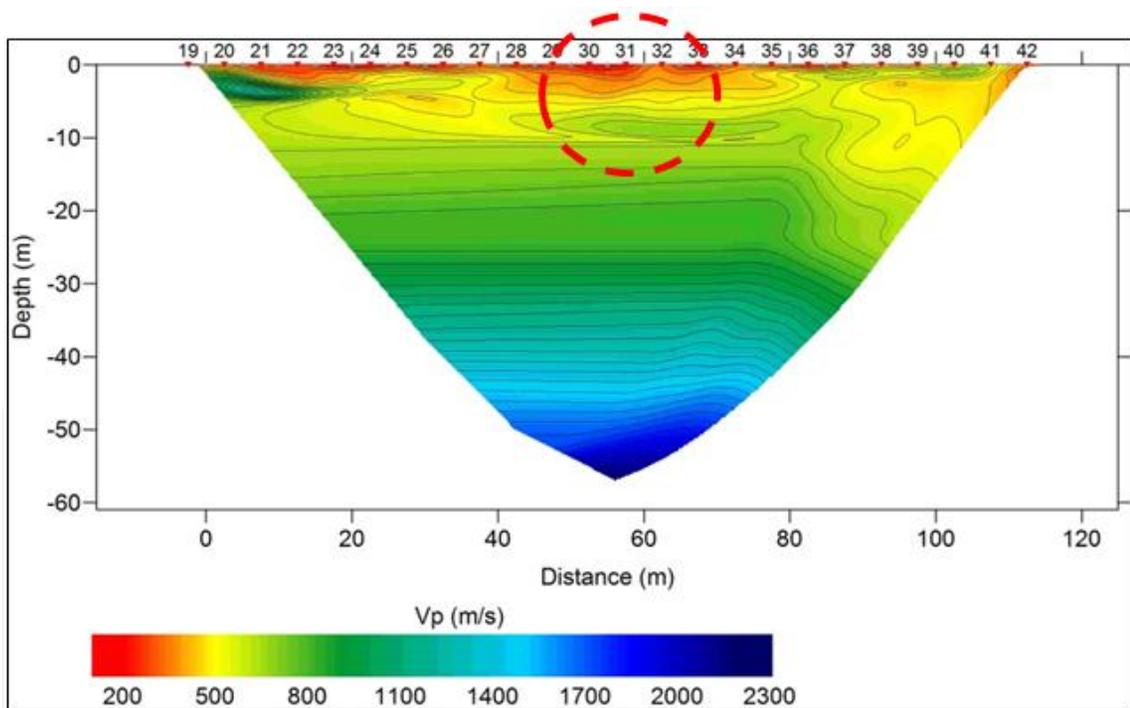


Figura 53. Perfil de velocidades de ondas P a partir de refracción sísmica, resaltando la zona donde se presenta la Falla oriente.



CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV

4. DISCUSIONES

Perfiles de resistividad por el método de sondeo eléctrico continuo (CVES)

El método geofísico de resistividad se realizó para demostrar cómo se distribuía la infiltración del agua visto en sección transversal, en una porción de la Falla Oriente. Lo que nos muestran los perfiles obtenidos de las resistividades aparentes es que es muy poca la variación de éstas, lo cual puede indicar que la infiltración del agua es mayor longitudinalmente que transversalmente en la discontinuidad geológica. Esto es, al hacer el vertido del agua y hacer los distintos sondeos eléctricos, las resistencias aparentes no tuvieron cambios fuertes en los perfiles obtenidos, y sabiendo que este tipo de sondeo eléctrico es muy sensible a los cambios de humedad, entonces se indicará un buen contraste entre zonas húmedas y zonas secas.

Sin embargo, aunque no existía variación en las resistividades en los perfiles, se encontró que es factible infiltrar agua a través de la discontinuidad por las mediciones realizadas en campo. Donde el agua se infiltró a un gasto medio de $0.1325 \text{ m}^3/\text{s}$ que equivale a $69,642 \text{ m}^3/\text{año}$, esto en 20 m a lo largo de la de la Falla oriente.

Relación de los perfiles obtenidos por los métodos geofísicos

En los métodos geofísicos tanto en el de CVES como en el de Refracción sísmica existe una relación, siendo la más importante donde se encuentra la discontinuidad, y es donde las resistividades en el CVES son muy altas y las velocidades en el sondeo de refracción sísmica son muy bajas. En la figura 54 se marcan algunas relaciones entre los perfiles y en la tabla se muestran las relaciones y en la tabla 36.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

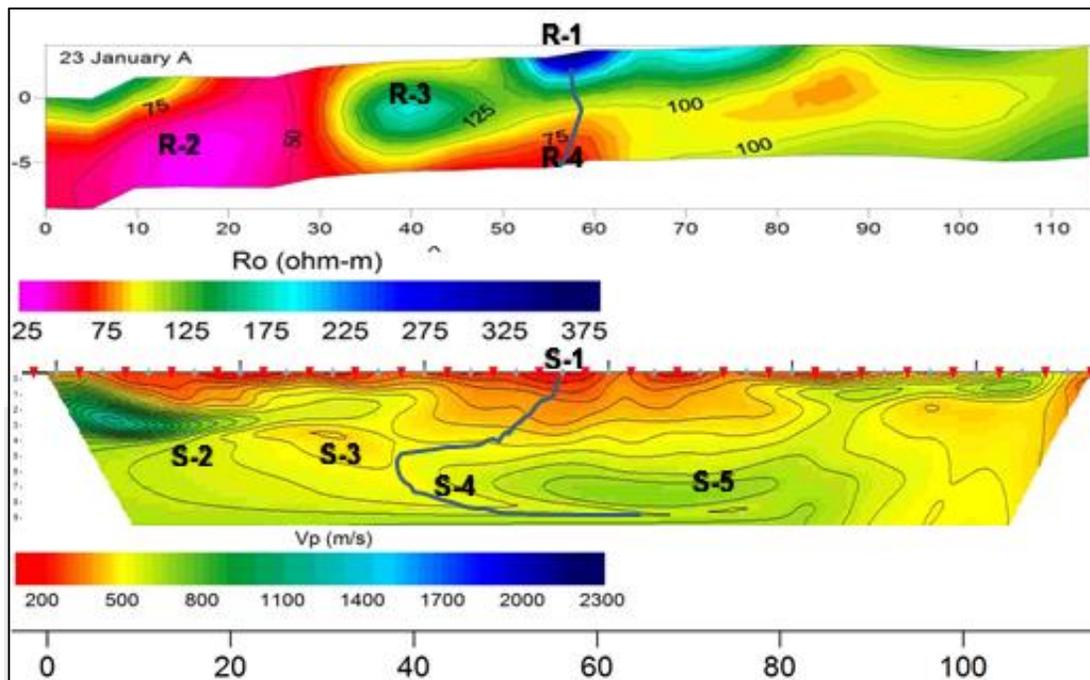


Figura 54. Relación de los perfiles obtenidos de los métodos de prospección geofísica.

Tabla 37. Observaciones ante la relación de los perfiles de prospección geofísica.

| CEVS | Refracción Sísmica | Observaciones |
|------|-----------------------|---|
| R-1 | S-1 | En estos puntos se encuentra la discontinuidad, y puede notarse que las resistencias son muy altas, llegando a 2,300 Ω -m, y las velocidades de ondas P son muy bajas, alrededor de 200 m/s. |
| R-2 | S-2 | En el punto R-2 existe un suelo con bajas resistencias, lo cual indicaría un contenido de humedad. Mientras que sus velocidades rondan en los 300 m/s, aumentando la velocidad según la profundidad, esto no muestra un lente pero podría decirse que va aumentando su consolidación. |
| R-3 | S-3 | En este punto podría tratarse de un material poco consolidado, o con separación en sus partículas debido a que sus resistencias aumentan y las velocidades disminuyen. |
| R-1 | R-4 | Entre estos dos puntos este podría ser uno de los trayectos que sigue el agua al infiltrarse a través de la discontinuidad, ya que se presenta un cambio de resistencias a muy poca profundidad. |
| S-1 | S-4 | Entre estos puntos se nota una posible trayectoria del agua a través de la discontinuidad, debido a que las velocidades de las ondas P son bajas, y que podría indicar que es un material poco consolidado. |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Embalse regulador de escurrimientos superficiales

Ya que a través de la discontinuidad es factible infiltrar agua, como ya fue mencionado anteriormente, una propuesta es crear un embalse que regule los escurrimientos y que permita proporcionar el caudal demandado por cierta longitud de la discontinuidad. El cual solamente se estimó a partir de los volúmenes de escurrimiento y la demanda de la falla. Las consideraciones fueron: que la discontinuidad tiene las mismas propiedades geométricas y geohidrológicas, e infiltrar los volúmenes totales de los escurrimientos medios anuales de la CE a través de la discontinuidad; donde se desprecian las pérdidas, como: infiltración en el vaso, evaporación y deficiencias. El análisis para dimensionar el embalse se muestra a continuación:

1. Considerando que se quisiera infiltrar el volumen de escurrimiento medio anual de la CE (816,973.83 m³), la distancia a lo largo de la discontinuidad necesaria para infiltrarlo sería de 234.62 m. Puesto que el volumen que demanda 20m de la Falla oriente ante la infiltración en un año es de 69,642 m³.
2. Para estimar el volumen de almacenamiento del embalse, se analizó la distribución porcentual a partir de los escurrimientos medios mensuales totales de la CE obtenidos en la tabla 31. Esta distribución porcentual se puede visualizar en la tabla 38.

Tabla 38. Distribución mensual del volumen de escurrimiento medio anual en la CE.

| AÑO | VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO MEDIO MENSUAL | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--|-----------|-----|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|--------------|
| | (m ³) | | | | | | | | | | | | |
| | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP | OCT | NOV | DIC | Σ |
| Media mensual total | 170,597.14 | 97,797.89 | - | 98,864.75 | 110,305.74 | 184,150.34 | 237,674.60 | 212,541.52 | 189,242.37 | 136,930.07 | 88,386.74 | 79,755.25 | 1,606,246.42 |
| % | 10.62 | 6.09 | 0 | 6.16 | 6.87 | 11.46 | 14.80 | 13.23 | 11.78 | 8.52 | 5.50 | 4.97 | 100% |
| Distribución del volumen medio anual | 86,769.63 | 49,742.26 | - | 50,284.89 | 56,104.04 | 93,663.10 | 120,886.77 | 108,103.51 | 96,253.03 | 69,645.79 | 44,955.53 | 40,565.36 | 816,973.89 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

3. Con el fin de conocer la demanda mensual de la discontinuidad en 234.62 m, se dividió la demanda anual de 816,973.89 m³ entre los 12 meses del año, siendo de 68,081.16 m³. El funcionamiento del vaso se realizó a partir de que cada período cumple con la ecuación de continuidad; de la cual se despreciaron las pérdidas, ya que solo es para tener una noción general de cuál es la superficie que se requeriría para el embalse.

A partir de lo mencionado en el párrafo anterior, la ecuación utilizada para estimar el cambio de almacenamiento es:

$$V_f = V_o + E_{si} - V_{inf}$$

En donde:

V_f : Volumen final de cada período en el embalse

V_o : Volumen inicial de cada período en el embalse

E_{si} : Volumen de escurrimiento mensual

V_{inf} : Volumen de infiltración al final de cada período

El volumen de infiltración máximo mensual que se puede lograr a través de la Falla oriente, es igual a la demanda de ésta misma. A partir de esto, el volumen de infiltración al final de cada período es:

$$V_{inf} = \begin{cases} D; & \text{si: } V_o + E_{si} \geq D \\ V_o + E_{si}; & \text{si: } V_o + E_{si} < D \end{cases}$$

En donde:

D : Demanda mensual de la Falla oriente

En la tabla 39 se analiza el funcionamiento del vaso de los períodos mensuales. Donde se considera un volumen inicial para el primer mes de 0 m³, y los volúmenes de escurrimiento medios de cada mes estimados en la tabla 38.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 39. Comportamiento mensual de los volúmenes de almacenamiento en el embalse en el primer año de operación.

| Año | Mes i | ENTRADAS | | | D | SALIDA Vinf | Vf= Vo+Esi-Vinf |
|-----|----------|------------|------------|------------|-----------|----------------|-----------------|
| | | Esi | Vo= Vfi-1 | Σ Entradas | | | Vf almacenado |
| 1 | E 1 | 86,769.63 | 0.00 | 86,769.63 | 68,081.16 | 68,081.16 | 18,688.47 |
| | F 2 | 49,742.26 | 18,688.47 | 68,430.73 | 68,081.16 | 68,081.16 | 349.57 |
| | M 3 | 0.00 | 349.57 | 349.57 | 68,081.16 | 349.57 | 0.00 |
| | A 4 | 50,284.89 | 0.00 | 50,284.89 | 68,081.16 | 50,284.89 | 0.00 |
| | M' 5 | 56,104.04 | 0.00 | 56,104.04 | 68,081.16 | 56,104.04 | 0.00 |
| | J 6 | 93,663.10 | 0.00 | 93,663.10 | 68,081.16 | 68,081.16 | 25,581.94 |
| | J' 7 | 120,886.77 | 25,581.94 | 146,468.71 | 68,081.16 | 68,081.16 | 78,387.55 |
| | A' 8 | 108,103.51 | 78,387.55 | 186,491.06 | 68,081.16 | 68,081.16 | 118,409.90 |
| | S 9 | 96,253.03 | 118,409.90 | 214,662.93 | 68,081.16 | 68,081.16 | 146,581.77 |
| | O 10 | 69,645.79 | 146,581.77 | 216,227.56 | 68,081.16 | 68,081.16 | 148,146.40 |
| | N 11 | 44,955.53 | 148,146.40 | 193,101.93 | 68,081.16 | 68,081.16 | 125,020.77 |
| | D 12 | 40,565.36 | 125,020.77 | 165,586.13 | 68,081.16 | 68,081.16 | 97,504.97 |
| Σ | | 816,973.89 | 661,166.39 | | | 719,468.92 | 758,671.37 |

Tabla 40. Comportamiento mensual de los volúmenes de almacenamiento en el embalse en el segundo año de operación.

| Año | Mes i | ENTRADAS | | | D | SALIDA Vinf | Vf= Vo+Esi-Vinf |
|-----|----------|------------|------------|------------|-----------|----------------|-----------------|
| | | Esi | Vo= Vfi-1 | Σ Entradas | | | Vf almacenado |
| 2 | E 1 | 86,769.63 | 97504.97 | 184,274.60 | 68,081.16 | 68,081.16 | 116,193.44 |
| | F 2 | 49,742.26 | 116,193.44 | 165,935.70 | 68,081.16 | 68,081.16 | 97,854.54 |
| | M 3 | 0.00 | 97,854.54 | 97,854.54 | 68,081.16 | 68,081.16 | 29773.39 |
| | A 4 | 50,284.89 | 29773.39 | 80,058.27 | 68,081.16 | 68,081.16 | 11977.12 |
| | M' 5 | 56,104.04 | 11977.12 | 68,081.16 | 68,081.16 | 68,081.16 | 0.00 |
| | J 6 | 93,663.10 | 0.00 | 93,663.10 | 68,081.16 | 68,081.16 | 25,581.94 |
| | J' 7 | 120,886.77 | 25,581.94 | 146,468.71 | 68,081.16 | 68,081.16 | 78,387.55 |
| | A' 8 | 108,103.51 | 78,387.55 | 186,491.06 | 68,081.16 | 68,081.16 | 118,409.90 |
| | S 9 | 96,253.03 | 118,409.90 | 214,662.93 | 68,081.16 | 68,081.16 | 146,581.77 |
| | O 10 | 69,645.79 | 146,581.77 | 216,227.56 | 68,081.16 | 68,081.16 | 148,146.40 |
| | N 11 | 44,955.53 | 148,146.40 | 193,101.93 | 68,081.16 | 68,081.16 | 125,020.77 |
| | D 12 | 40,565.36 | 125,020.77 | 165,586.13 | 68,081.16 | 68,081.16 | 97,504.97 |
| Σ | | 816,973.89 | 995,431.81 | | | 816,973.89 | 995,431.81 |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

A partir de las tablas 39 y 40, se muestra que en el primer año se infiltrarían a través de la discontinuidad el 88.06% de los escurrimientos medios anuales de la CE, equivalente a 719,468.92 m³; mientras que a partir del segundo año se regularían los volúmenes de escurrimiento medios de los períodos hasta lograr infiltrar el 100%, equivalente a 816,973.89 m³. Así mismo, en ambos años se presenta el valor máximo de almacenamiento final, equivalente a 148,146.40 m³ (celda roja) para dimensionar el embalse. Considerando que el embalse tendrá una superficie rectangular, el dimensionamiento queda de la siguiente manera:

Tabla 41. Dimensiones del embalse propuesto.

| Símbolo | Valores exactos | Valor redondeado | Descripción |
|----------------------|------------------------|-------------------------|---|
| L₁ | 234.62 | 235 | Lado 1 del embalse. Longitud de la discontinuidad necesaria para infiltrar el volumen de escurrimiento medio anual, en m. |
| L₂ | 250 | 250 | Lado 2 del embalse, en m. |
| H | 2.53 | 2.6 | Profundidad del embalse, en m. |
| V_a | 148,146.40 | 152,750.00 | Volumen de almacenamiento del embalse, en m ³ |

4. Una de las consideraciones del embalse es que se construya aguas arriba de discontinuidad, para evitar que llegue a ser afectado por la discontinuidad y así mismo evitar los azolves producidos por la erosión ante los escurrimientos de la CE que podrían rellenar la discontinuidad obstaculizando el flujo del agua a través de ella.
5. Otras consideraciones, que no se tomaron en cuenta en este estudio, son los aspectos que mejorarían el dimensionamiento del embalse, como los son: los volúmenes de evaporación, capacidad de azolves del embalse, los volúmenes de excedencias, entre otros. Cabe mencionar que el llevar un buen control de los azolves impediría, además de la disminución del volumen de agua en el embalse, la obstrucción de los conductos naturales en la discontinuidad que provocarían una disminución en la demanda de ésta.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Si se considerara recargar estos escurrimientos, el acuífero del Valle de Aguascalientes tendría una disminución en la disponibilidad negativa que presenta actualmente, que es de 124.29 hm^3 . La disminución a este déficit es del 0.66%, que equivale a 0.817 hm^3 ; por lo que la disponibilidad negativa resultante es de 123.4730 hm^3 . Este déficit proviene de la suma algebraica de la recarga total media anual ($+235 \text{ hm}^3$) con la descarga natural comprometida (-10 hm^3), el volumen concesionado (-349.29 hm^3) (COTAS, 2010), y por último la recarga artificial a partir de los escurrimientos superficiales calculados ($+0.817 \text{ hm}^3$). Lo anterior es determinado conforme al método establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2000 y con la suma del volumen infiltrado calculado por la porción de la discontinuidad.

Haciendo una comparativa con el estudio del INAGUA (2010), donde se encontró a partir de modelaciones, el agua en balsas de infiltración tardaría más de 5 años en llegar al acuífero, para un caudal de 75 l/s y se ocuparía una superficie de 2 km^2 . Mientras que en este estudio se puede aportar un caudal constante que demanda la falla de $0.1325 \text{ m}^3/\text{s}$, equivalente a 132.5 l/s . Así mismo, para poder recargar los escurrimientos medios anuales de la CE se requiere una superficie del embalse 0.05875 km^2 a una profundidad de 2.6 m ; esto último a partir de la propuesta considerada. Esto nos indica que aprovechar los escurrimientos superficiales y ser potencializados en esta porción de la Falla oriente no requieren de grandes superficies para almacenar el agua, y generando un mayor aporte que los balsas de balsas de infiltración.

Aunque, en este estudio no fue posible demostrar a partir de los CVES el comportamiento del agua transversalmente en la falla oriente, puede suponerse que el agua se desplaza a lo largo de ésta. Esto puede quedar como nicho de oportunidades, haciendo CVES longitudinales y trasversales a la discontinuidad, pero a profundidades mayores, puesto que en este estudio solo se realizaron sondeos someros ($\approx 9 \text{ m}$).

Consideraciones ambientales

Ya que en la CE distintos usos de suelo (cultivo, edificación, localidades y pastizal) pueden acarrear contaminantes hacia la discontinuidad, aunque están fuera del alcance de este estudio, es necesario tomar medidas rigurosas para evitar la

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

contaminación del acuífero. Algunas consideraciones serían: separar el alcantarillado sanitario del alcantarillado pluvial, controlar los desechos de las industrias, hacer cultura ambiental en los ciudadanos para evitar contaminantes que puedan llegar al cauce principal, control y detección de fugas de conductos, etcétera.

En sintonía con lo anterior, también es necesario realizar limpieza a lo largo de la discontinuidad y las zonas aledañas a ella; puesto que existe la presencia de basura, animales muertos, desechos de escombros (sin ningún control), son factores importantes que desatarían una contaminación del suelo y a su vez el acuífero.

La normativa aplicable para este caso sería la NOM-015-CONAGUA-2007 del 18 de agosto del 2009, que es referente a la infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua; donde uno de sus objetivos es aprovechar el agua pluvial y de escurrimientos superficiales para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración artificial.

Ésta normativa antes mencionada considera en algunas de sus especificaciones: respetar lo dispuesto por las declaratorias de áreas naturales protegidas y sus programas de manejo; caracterización del suelo; estabilización del suelo en áreas propensas a deslaves; detectar que el terreno no esté inscrito como predio contaminado; no se podrá realizar disposición al suelo o subsuelo de aguas residuales crudas, o la mezcla de éstas con aguas pluviales o de escurrimiento superficial; la disposición del agua, previendo que se tenga una limpieza de basura de la zona; entre otras.

En cuestión a la disposición del agua proveniente de escurrimientos superficiales antes de ser vaciada en la discontinuidad, se debe cumplir con las especificaciones mencionadas en el párrafo anterior y con algunas que hacen referencia a la calidad del agua (Diario Oficial de la Federación, 2009), se mencionan textualmente tres de estas especificaciones que marca la NOM-015-CONAGUA-2007, que son:

1. La infiltración no deberá afectar la calidad del agua nativa.
2. Se deberá contar con un sistema de tratamiento que garantice que el agua en el punto de infiltración tendrá los límites establecidos en la tabla 42.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tabla 42. Límites establecidos del agua a infiltrar antes de la operación.

| Contaminante | Unidad de medida | Límite | Método de prueba* | Método de muestreo |
|-----------------------------|------------------|---------------|-------------------------|--------------------|
| Grasas y Aceites | Mg/L | 15 | NMX-AA-005-SCFI-2000 | NMX-AA-003-1980 |
| Materia Flotante | Unidad | 0 | NMX-AA-006-SCFI-2000 | |
| Sólidos Sedimentables | Mg/L | 2 | NMX-AA-004-SCFI-2000 | |
| Sólidos Suspendidos Totales | Mg/L | 150 | NMX-AA-034-SCFI-2001 | |
| Nitrógeno Total | Mg/L | 40 | 40 NMX-AA-026-SCFI-2001 | |
| Fósforo Total | Mg/L | 20 | NMX-AA-029-SCFI-2001 | |
| Coliformes Fecales | NMP/100 ml | No detectable | NMX-AA-042-1987 | |

Fuente: Diario Oficial de la Federación (2009).

3. Las pruebas a que se refiere la tabla anterior se deberán aplicar al sistema de tratamiento antes de su operación.

Así mismo, ésta normativa menciona aspectos de monitoreo; operación del sistema de disposición, que refiere que se deberá contar con dispositivos de cierre; mantenimiento, mencionando el periodo máximo para hacerlo y que se debe mantener un programa de mantenimiento y de señalización.



CONCLUSIONES

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio primordialmente era conocer el comportamiento del agua ante la infiltración en una porción de la Falla oriente del valle de Aguascalientes. Y fue donde, a partir la implementación del métodos de prospección geofísica, específicamente los sondeos eléctricos continuos, que se desarrollaron de manera somera, y transversal a la discontinuidad geológica y también los resultados obtenidos en campo, se puede concluir que el agua que es vertida en la falla puntualmente se distribuye primordialmente a lo largo de 20 m de la Falla oriente, si el gasto es de $0.1325 \text{ m}^3/\text{min}$. Con esto se puede decir que la infiltración a través de la discontinuidad es factible, ya que si se quisiera infiltrar ese gasto anualmente se tendría un volumen de $69,642 \text{ m}^3$, esto sólo en 20 m de la porción de la Falla oriente.

Para ir concluyendo, si se quisieran infiltrar el volumen de escurrimiento medio anual superficial proporcionado por la cuenca de estudio, equivalente a 0.817 hm^3 , se requeriría proponer un embalse que pueda almacenar los volúmenes escurridos mensualmente. Donde el embalse propuesto se dimensiono a partir del mes que mayor volumen de almacenamiento mensual llega a tener, siendo 0.148 hm^3 , y la longitud máxima requerida de la discontinuidad geológica para lograr captar estos escurrimientos, considerando las mismas propiedades geométricas e hidrogeológicas de la discontinuidad geológica, es de 234.62 m.

Si el volumen de escurrimiento medio anual proporcionados por la cuenca de estudio se infiltraran hasta llegar al acuífero, la disponibilidad media anual del agua subterránea que se presenta el acuífero del valle de Aguascalientes, según el caculo realizado por (COTAS, 2010) a partir de la NOM-011-CONAGUA-2000, es de -124.29 hm^3 y disminuiría un 0.66%; resultando una disponibilidad media anual del agua subterránea de -123.473 hm^3 . Esto nos indica que la aportación de los escurrimientos superficiales de las distintas cuencas hidrológicas donde sus cauces principales se vean afectados por el cruce de una discontinuidad geológica con potencial de recarga del acuífero, podrían atenuar la problemática del déficit presente en el valle de Aguascalientes. Esto sin considerar la cultura del agua que debe ser presente en todos y cada uno de los seres humanos, y así como implementar todo tipo de tecnologías y para evitar el uso excesivo del recurso hídrico.

GLOSARIO

A

Agua nativa

El agua existente en el cuerpo receptor de aguas nacionales antes de que se inicie la disposición de aguas en el mismo.

C

CE: Cuenca hidrógrafica de estudio

Es la microcuenca a la cual se le hacen los estudios hidrológicos en este trabajo de Tesis.

D

Discontinuidad geológica

Término que se maneja en este documento cuando nos referimos a fallas, grietas y fisuras. Hablando específicamente de las deformaciones del suelo.

F

Falla

Es una discontinuidad del suelo que tiene desplazamientos verticales con o sin desplazamientos horizontales. Siempre tiene presencia de esfuerzos cortantes.

M

MDE: Modelo digital de elevación

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo.

Métodos geofísicos

Son métodos empleados para hacer prospección geofísica, en este estudio fueron utilizados el de sondeo eléctrico y el de refracción sísmica.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

R

RH: Región Hidrológica

De acuerdo a los trabajos realizados por la Conagua, el INEGI y el INE, se han identificado 1,471 cuencas hidrográficas en el país, las cuales se han agrupado y/o subdividido en cuencas hidrológicas para fines de publicación de la disponibilidad de aguas superficiales.

RHA: Regiones Hidrológico-Administrativas

Circunscripción territorial de los organismos de cuenca que administran las aguas nacionales e incorporación de nuevos municipios.

S

SIG: Sistema de información geográfica

Conjunto de herramientas diseñadas para obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos espaciales del mundo real.

Datos

Conjunto de mapas, de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas.

Resulta posible realizar análisis de sus características espaciales y temáticas, para obtener un mejor conocimiento de esa zona. 42

U

Uso consuntivo

El volumen de agua de una calidad determinada que se consume al llevar a cabo una actividad específica, el cual se determina como la diferencia del volumen de una calidad determinada que se extrae, menos el volumen de una calidad también determinada que se descarga, y que se señalan en el título respectivo.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

REFERENCIAS CITADAS

Bense, V., Gleeson, D., Loveless, S. E., Bour, O., & Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127, 171–192.

Campos-Aranda, D. F. (1984). *Procesos del ciclo hidrológico* (Vol. 1). San Luis Potosi: Universitaria Potosina.

CONAGUA, C. N. del A. (2007). Regiones Hidrológicas, escala 1:250000. República Mexicana. Recuperado el 14 de abril de 2016, a partir de http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rh250kgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

CONAGUA, C. N. del A. (2009, mayo 27). Regiones Hidrológicas Administrativas (Organismos de Cuencas). Recuperado el 26 de abril de 2016, a partir de http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/rha250kgw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no

CONAGUA, C. N. del A. (2010). Clima en México. Recuperado el 20 de abril de 2014, a partir de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80

CONAGUA, C. N. del A. (2012). Situación de los Recursos Hídricos (Parr. 1-2). Recuperado el 20 de abril de 2014, a partir de <http://www.conagua.gob.mx/Contenido.aspx?n1=3&n2=60&n3=87&n4=29>

CONAGUA, C. N. del A. (2014). Estadísticas del agua en México, Edición 2014. Coordinación General de Comunicación y Cultura del Agua de la Comisión Nacional del Agua. Recuperado a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM2014.pdf>

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

COTAS, C. T. de A. S. (2010). Presentación de los resultados de los acuíferos: Valle de Aguascalientes, Clave0101, Estado de Aguascalientes Encarnación, Clave 1422, Estado de Jalisco Ojocaliente, Clave 3212, Estado de Zacatecas. Recuperado a partir de http://www.cotas.org.mx/documentos/Aguascalientes_Ojocaliente_Encarnaci%F3n-Agosto2010x.pdf

Diario Oficial de la Federación. Decreto por el que se establece veda por tiempo indefinido para el alumbramiento de aguas del subsuelo en la zona que comprende todo el estado de Aguascalientes (1963). Recuperado a partir de http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/pdf-vedas%20subterr%C3%A1neas/1-ags/630524_EDOAGS_AGS.pdf

Diario Oficial de la Federación. (2009, agosto 18). NOM-015-CONAGUA-2007, Infiltración artificial de agua a los acuíferos.- Características y especificaciones de las obras y del agua. Recuperado a partir de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/NOM-015-CONAGUA2007.pdf>

Dirección General de Geografía y Medio Ambiente, I. (2010). Documento técnico descriptivo de la red hidrográfica-Escala 1:50 000.

Flores, M. E. L., Chávez, R. E., Martínez, S. R. G., Herrera, B. J., Tejero, A. A., & Belmonte, S. (2001). Geophysical characterization of the Etna Valley aquifer, Oaxaca, Mexico. *Geofísica Internacional*, 40(4), 245–257.

Gannon, J. P., Burbey, T. J., Bodnar, R. J., & Aylor, J. (2012). Geophysical and geochemical characterization of the groundwater system and the role of Chatham Fault in groundwater movement at the Coles Hill uranium deposit, Virginia, USA. Recuperado a partir de

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

https://www.researchgate.net/publication/257471494_Geophysical_and_geochemical_characterization_of_the_groundwater_system_and_the_role_of_Chatham_Fault_in_groundwater_movement_at_the_Coles_Hill_uranium_deposit_Virginia_USA

Gobierno del Estado de Aguascalientes 2010-2016. (2010). Clima. Recuperado el 14 de abril de 2016, a partir de <http://www.aguascalientes.gob.mx/estado/Clima.aspx>

GreenFacts. (2014a). ¿Cómo amenaza la sedimentación a los ecosistemas acuáticos? (Nivel 4.1). Distribución de las precipitaciones entre aguas superficiales y subterráneas (por regiones climáticas) (Tabla 4.1). Recuperado el 5 de abril de 2014, a partir de <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/figtableboxes/1.htm>

GreenFacts. (2014b). ¿Cómo pasa el agua de la atmósfera al suelo y viceversa? (Nivel 2.1, Parr.1). Recuperado el 5 de abril de 2014, a partir de <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/l-2/2-disponibilidad.htm#0>

Hernández-Marín, M., González-Cervantes, N., Pacheco-Martínez, J., & Frías-Guzmán, D. H. (2015). Discussion on the origin of surface failures in the Valley of Aguascalientes, México. *Proc. IAHS*, 372, 235–238. <http://doi.org/10.5194/piahs-372-235-2015>

Hernández-Marín, M., Pacheco-Martinez, J., Ramirez-Cortes, A., Burbey, T. J., Ortiz-Lozano, J. A., Zermeño-de-Leon, M. E., ... Pinto-Aceves, G. (2014). Evaluation and analysis of surface deformation in west Chapala basin, central Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 72(5), 1491–1501. <http://doi.org/10.1007/s12665-014-3054-7>

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

INAGUA, I. del A. del E. de A. (2010). *Estudio de la recarga artificial del acuífero del Valle de Aguascalientes* (Proyecto). Aguascalientes: INAGUA.

INEGI, I. N. de E. y G. (2013, noviembre 6). Conjunto de datos vectorial Edafológico escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional). Recuperado el 19 de abril de 2016, a partir de http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/edafologia/vectorial_serieii.aspx

INEGI, I. N. de E. y G. (2016). Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) - descarga. Recuperado el 14 de abril de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>

INEGI, I. N. de E. y G. (s/f-a). Climatología. Recuperado el 19 de abril de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/clima/default.aspx>

INEGI, I. N. de E. y G. (s/f-b). Fisiografía. Recuperado el 19 de abril de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/fisiografia/default.aspx>

INEGI, I. N. de E. y G. (s/f-c). Geología. Recuperado el 19 de abril de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/default.aspx>

INEGI, I. N. de E. y G. (s/f-d). Uso de suelo y vegetación. Recuperado el 19 de abril de 2016, a partir de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/usosuelo/>

Martínez-Martínez, S. I. (2011a). Geomorfología de la cuenca. En *Introducción a la Hidrología Superficial* (pp. 38–79). Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Martínez-Martínez, S. I. (2011b). *Introducción a la Hidrología Superficial*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Molina-Padrón, W.-L. (2006, julio). *Comparación de los métodos 1-D y 2-D de resistividad eléctrica por medio de sondeos tipo Wenner, Dipolo-Dipolo y Wenner-Schlumberger con la utilización de los programas DCINV, RES2DMOD*

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Y RES2DINV. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas. Recuperado a partir de <http://documents.mx/documents/tesis-geofisica-resistividad.html>

Moya, C. E., Raiber, M., & Cox, M. E. (2014). Three-dimensional geological modelling of the Galilee and central Eromanga basins, Australia: New insights into aquifer/aquitard geometry and potential influence of faults on inter-connectivity. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2, 119–139. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2014.08.007>

Pacheco-Martínez, J. (2007). *Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla, Querétaro.

Pacheco-Martínez, J., Hernandez-Marín, M., Burbey, T. J., González-Cervantes, N., Ortiz-Lozano, J. Á., Zermeño-De-Leon, M. E., & Solís-Pinto, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172–186. <http://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.015>

Pacheco-Martínez, J., Zermeño-De-León, M. E., Mendoza-Otero, E., & de-Alba-Obregón, R. (2012). *Zonificación del peligro por subsidencia: Caso Aguascalientes* (1a ed.). Aguascalientes: Departamento Editorial de la Dirección General de Difusión y Vinculación de la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Petrie, E. S., Petrie, R. A., & Evans, J. P. (2014). Identification of reactivation and increased permeability associated with a fault damage zone using a multidisciplinary approach. *Journal of Structural Geology*, 59, 37–49. <http://doi.org/10.1016/j.jsg.2013.11.008>

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Secretaría de Obras Públicas del Gobierno del Estado de Aguascalientes. (2010).

Introducción "SIFAGG". Recuperado a partir de <http://www.aguascalientes.gob.mx/sop/sifagg/web/Documentos/Introduccion.pdf>

SEMADESU, S. del M. A. y D. S. (2011). *Programa de rehabilitación y rescate de microcuencas "Revive tu arroyo"*. Aguascalientes: Presidencia Municipal de Aguascalientes 2011-2013. Recuperado a partir de

<http://www.agscumple.gob.mx/phpSIME/evidencias/PROGRAMA%20DE%20REHABILITACION%20Y%20RESCATE%20DE%20MICROCUENCAS%20ajustado.pdf>

Sequeira Gómez, L., & Escolero Fuentes, O. (2010). The application of electrical methods in exploration for ground water resources in the River Malacatoya sub-basin, Nicaragua. *Geofísica Internacional*, 49(1), 27–41.

Servicio Meteorológico Nacional, S. (2010). Estaciones climáticas. Recuperado el 16 de abril de 2016, a partir de http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75

Shiklomanov, I. A., & Rodda, J. C. (2004). *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century*. Cambridge University Press. Recuperado a partir de <https://books.google.com.mx/books?id=9PYGNS3yF5gC>

Sistema Nacional de Información del Agua. (2012a). Regiones hidrológicas. Recuperado el 14 de abril de 2016, a partir de <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo09.html>

Sistema Nacional de Información del Agua. (2012b). Regiones hidrológico-administrativas. Recuperado el 14 de abril de 2016, a partir de <http://www.conagua.gob.mx/atlas/contexto07.html#>

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005). Deformación de la corteza. En *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física* (8va ed.). Madrid: Prentice Hall.

Recuperado a partir de
<http://usuarios.geofisica.unam.mx/cecilia/cursos/LibroTarbuck.html>

TGT- www.geofisica.cl. (s/f). Introducción a la prospección geofísica, versión 2.7.2.

Recuperado a partir de
http://www.geofisica.cl/English/pics6/Introduccion_a_la_Geofisica.pdf



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través
de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

APÉNDICES Y ANEXOS

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

APÉNDICES Y ANEXOS

A-1. REGISTRO DE LLUVIAS MEDIAS MENSUALES EN LA ESTACIÓN AGUASCALIENTES II (1097) PROPORCIONADO POR CONAGUA.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
 COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DIRECCIÓN LOCAL AGUASCALIENTES
 PROYECTO DE BASES DE DATOS CLIMATOLÓGICOS SUBDIRECCIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA-OPERATIVA
 DEPARTAMENTO DE HIDROMETEOROLOGÍA

1097 AGUASCALIENTES II TIPO: CLIMATOLÓGICA
 ESTADO: AGUASCALIENTES REGION: LERMA SANTIAGO PACIFICO LATITUD: 21 54' 20" N
 MUNICIPIO: AGUASCALIENTES CUENCA: RIO VERDE LONGITUD: 102 15' 53" W
 ELEMENTO: LLUVIA MEDIA MENSUAL SUBCUENCA: RIO AGUASCALIENTES ALTITUD: 1,890 m.s.n.m.

| AÑO | ENERO | FEBRERO | MARZO | ABRIL | MAYO | JUNIO | JULIO | AGOSTO | SEPTIEMBRE | OCTUBRE | NOVIEMBRE | DECIEMBRE | ACUMULADA | MEDIA | MESES |
|----------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|---------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
| 1995 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | 165.3 | 99.9 | 2.3 | 7.8 | 6.3 | 281.6 | 56.3 | 5 |
| 1996 | 0 | 0 | 0 | 14 | 4 | 40.2 | 38.3 | 71.5 | 160.5 | 89 | 0 | 0 | 417.5 | 34.8 | 12 |
| 1997 | 0 | 16 | 9 | 50 | 10.3 | 88 | 59 | 29.5 | 33.5 | 20 | 26.5 | 0 | 343.8 | 28.7 | 12 |
| 1998 | 0 | 2 | 0 | 0 | 0 | 100 | 88 | 78.1 | 96.2 | 17 | 1 | 0 | 382.3 | 31.9 | 12 |
| 1999 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 77 | 107.5 | 132 | 107.7 | 4.7 | 0 | 0 | 428.9 | 35.7 | 12 |
| 2000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 61.5 | 123 | 75.5 | 54.5 | 43.7 | 12.5 | 0 | 34 | 404.7 | 33.7 | 12 |
| 2001 | 0 | 7.5 | 21 | 35.5 | 25.5 | 95 | 106.5 | 114.7 | 101.8 | 10.9 | 0 | 0.7 | 519.1 | 43.3 | 12 |
| 2002 | 34 | 21.1 | 0 | 10 | 35.7 | 62 | 145.4 | 79 | 152 | 66 | 40 | 0 | 645.2 | 53.8 | 12 |
| 2003 | 2.5 | 1.2 | 0 | 0 | 3 | 119.7 | 184.4 | 102.5 | 137.7 | 46 | 2 | 0 | 599 | 49.9 | 12 |
| 2004 | 39.4 | 1 | 26.5 | 0 | 45.5 | 247.7 | 131.8 | 84.7 | 110.8 | 21.5 | 0 | 0 | 708.9 | 59.1 | 12 |
| 2005 | 0 | 46.8 | 8.2 | 0 | 12.5 | 13.3 | 158 | 217.2 | 26.7 | 14.5 | 0 | 2.2 | 499.4 | 41.6 | 12 |
| 2006 | 2.9 | 9.3 | 0 | 0 | 58.7 | 55.6 | 134.3 | 126.9 | 66.5 | 129 | 28.5 | 10 | 621.7 | 51.8 | 12 |
| 2007 | 27.2 | 17.5 | 0 | 0 | 12.4 | 276.5 | 169.9 | 40.3 | 62.9 | 14 | 1 | 2.3 | 624 | 52 | 12 |
| 2008 | 0 | 20 | 0 | 9 | 2.5 | 72.7 | 203.1 | 352.7 | 91 | 1.2 | 0 | 0 | 752.2 | 62.7 | 12 |
| 2009 | 0 | 0 | 0 | 40 | 7.9 | 52.5 | 50.3 | 119 | 111.9 | 31.6 | 13.5 | 4 | 430.7 | 35.9 | 12 |
| 2010 | 46.2 | 109.1 | 0 | 0 | 7.5 | 61.6 | 159.7 | 90.2 | 68.62 | 0 | 0 | 0 | 542.9 | 45.2 | 12 |
| 2011 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 85.6 | 19.9 | 77.9 | 85.2 | 18.7 | 1 | 0 | 288.3 | 24 | 12 |
| 2012 | 9.7 | 53.4 | 0 | 0 | 7.2 | 96 | 150.5 | S/D | S/D | S/D | S/D | S/D | 316.8 | 45.3 | 7 |
| 2013 | S/D | 0 | 2 | 0 | 19 | 145.2 | 196.5 | 75.5 | 117.9 | 31.8 | 38 | 73 | 698.9 | 63.5 | 11 |
| MINIMA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.3 | 19.9 | 29.5 | 26.7 | 0 | 0 | 0 | 281.6 | 24 | |
| MAXIMA | 46.2 | 109.1 | 26.5 | 50 | 61.5 | 276.5 | 203.1 | 352.7 | 160.5 | 129 | 40 | 73 | 752.2 | 63.5 | |
| MEDIA | 9.5235 | 17.05 | 3.7055 | 8.8055 | 17.4 | 100.64 | 121.03 | 111.75 | 93.028 | 29.483 | 8.85 | 7.3611 | 500.3 | 44.7 | |
| ESTANDAR | 16.104 | 28.009 | 7.8528 | 15.98 | 19.929 | 66.785 | 55.8 | 74.935 | 37.819 | 33.962 | 14.139 | 18.272 | 149.1 | 11.7 | |

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

A-2. REGISTRO DE LLUVIAS MEDIAS MENSUALES EN LA ESTACIÓN CAÑADA HONDA (1004) PROPORCIONADO POR CONAGUA.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DIRECCIÓN LOCAL AGUASCALIENTES
 PROYECTO DE BASES DE DATOS CLIMATOLÓGICOS SUBDIRECCIÓN DE ASISTENCIA TÉCNICA-OPERATI
 DEPARTAMENTO DE HIDROMETEOROLOGÍA

1004 CAÑADA HONDA

ESTADO: AGUASCALIENTES
 MUNICIPIO: AGUASCALIENTES
 ELEMENTO: LLUVIA MEDIA MENSUAL

TIPO: CLIMATOLOGICA
 REGION: LERMA SANTIAGO PACIF LATITUD: 22° 0' 3" N
 CUENCA: RIO VERDE LONGITUD: 102° 11' 56" W
 SUBCUENCA: RIO CHICALOTE ALTITUD: 1925 m.s.n.m.

| AÑO | E | F | M | A | M' | J | J' | A | S | O | N | D | ACUM | MEDIA | MESES |
|------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 1970 | S/D | S/D | 0 | 0 | 5 | 142.1 | 128 | 121 | 161.7 | 17.5 | 20.5 | 0 | 595.8 | 59.6 | 10 |
| 1971 | 4.2 | 0 | 4 | 0 | 66 | 193.5 | 44.3 | 117.2 | 188.9 | 16.9 | 0 | 1.3 | 636.3 | 53 | 12 |
| 1972 | 5.9 | 0 | 23 | 6.5 | 126 | 97.5 | 82.5 | 75.5 | 90.5 | 21 | S/D | 2 | 530.4 | 48.2 | 11 |
| 1973 | 30 | 10 | 0 | 0 | 7 | 89 | 127.5 | 197.5 | 19.5 | 120.6 | 0 | 0 | 601.1 | 50.1 | 12 |
| 1974 | 2.3 | 1.7 | 6.2 | 2.2 | 11.2 | 8.8 | 111.4 | 101.4 | 95.3 | 10.9 | 4.5 | 17.5 | 373.4 | 31.1 | 12 |
| 1975 | 21.1 | 0.6 | 0 | 7.5 | 13.2 | 87.2 | 160.5 | 143.1 | 6.4 | 2.8 | 0 | 10.7 | 453.1 | 37.8 | 12 |
| 1976 | 1.3 | 0 | 0.1 | 3.4 | 2.4 | 24.1 | 340.5 | 13.5 | 63.7 | 56.1 | 68.5 | 16.8 | 590.4 | 49.2 | 12 |
| 1977 | 1.5 | 0 | 0 | 0.6 | 1.9 | 77.7 | 95.3 | 122.8 | 48.3 | 33.3 | 5.5 | 5 | 391.9 | 32.7 | 12 |
| 1978 | 0 | 5 | 0 | 0 | 18 | 56.7 | 139.7 | 144.3 | 135.3 | 93.1 | 3.8 | 4.6 | 600.5 | 50 | 12 |
| 1979 | 0 | 8.8 | 0 | 0 | 10.9 | 18.2 | 52.2 | 130.7 | 88.4 | 0 | 0 | 1.5 | 310.7 | 25.9 | 12 |
| 1980 | 47.8 | 15.5 | 0 | 12.5 | 0 | 10 | 40.5 | 168.1 | 64 | 42 | 21.5 | 28 | 449.9 | 37.5 | 12 |
| 1981 | 64.4 | 32 | 2 | 36 | 23 | 31 | 78.4 | 61 | 44 | 11.5 | 24 | 0 | 407.3 | 33.9 | 12 |
| 1982 | 0 | 0 | 0.3 | 5 | 11.5 | 3 | 92 | 84.4 | 25.9 | 63.4 | 39.5 | 40.3 | 365.3 | 30.4 | 12 |
| 1983 | 28 | 0 | 0 | 0 | 33 | 63.4 | 233.1 | 119.9 | 90 | 25.2 | 12.5 | 0 | 605.1 | 50.4 | 12 |
| 1984 | 27.8 | 4.2 | 0 | 0 | 28.3 | 98.7 | 170.1 | 101.7 | 38.9 | 11.8 | 0 | 6 | 487.5 | 40.6 | 12 |
| 1985 | 6.3 | 1 | 0 | 35.3 | 17.4 | 103.3 | 38.3 | 107.7 | 30.9 | 34.3 | 0 | 22.7 | 397.2 | 33.1 | 12 |
| 1986 | 0 | 8.2 | 0 | 3.3 | 5 | 203.8 | 45.8 | 33.5 | 138.2 | 85.9 | 20.9 | 0.2 | 544.8 | 45.4 | 12 |
| 1987 | 45.7 | 50 | 0 | 15.2 | 54.6 | 69.3 | 138 | 44.2 | 52 | 0 | 0 | 1.2 | 470.2 | 39.2 | 12 |
| 1988 | 23.2 | 0.2 | 6.8 | 24.9 | 0 | 56.9 | 137.2 | 83.2 | 93.5 | 3.5 | 1.1 | 2.3 | 432.8 | 36.1 | 12 |
| 1989 | 0.5 | 0.2 | 0 | 0 | 18.6 | 18 | 55.8 | 115.7 | 52.6 | 0.2 | 18.3 | 41.5 | 321.4 | 26.8 | 12 |
| 1990 | 12.6 | 28.9 | 0 | 0.8 | 28.7 | 33.3 | 203.4 | 195.3 | 80.1 | 75.4 | 0 | 0 | 658.5 | 54.9 | 12 |
| 1991 | 0 | 6.2 | 0 | 0 | 2 | 85.3 | 519.2 | 38.1 | 139.2 | 17.2 | 0.4 | 9.5 | 817.1 | 68.1 | 12 |
| 1992 | 183.4 | 3.3 | 1 | 18 | 35.7 | 27.4 | 151 | 81.9 | 25.3 | 88.2 | 18 | 6.7 | 639.9 | 53.3 | 12 |
| 1993 | 27.3 | 0.2 | 0 | 2.5 | 19.9 | 141 | 116.5 | 46.6 | 36.9 | 10.7 | 0.6 | 0 | 402.2 | 33.5 | 12 |
| 1994 | 9.7 | 0 | 0.3 | 26.3 | 19.9 | 106.9 | 40.2 | 64.7 | 82.8 | 35.7 | 0 | 0.3 | 386.8 | 32.2 | 12 |
| 1995 | 3.3 | 2.7 | 0 | 0 | 23.7 | 43.5 | 96.1 | 232.2 | 107.5 | 0 | 7.7 | 22.4 | 539.1 | 44.9 | 12 |
| 1996 | 0 | 1.5 | 0 | 16.7 | 5.6 | 33.5 | 30.2 | 97.2 | 108.1 | 108.9 | 0.5 | 0 | 402.2 | 33.5 | 12 |
| 1997 | 37.2 | 20 | 13.3 | 43.6 | 18.1 | 71.8 | 58 | 79.6 | 25.1 | 32.9 | 27 | 23.2 | 449.8 | 37.5 | 12 |
| 1998 | 0 | 1.7 | 0 | 0 | 0 | 75.9 | 48.8 | 87.9 | 184.5 | 41.4 | 0.2 | 0 | 440.4 | 36.7 | 12 |
| 1999 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 38.4 | 134.1 | 124.8 | 61 | 0.7 | 0 | 0 | 363 | 30.3 | 12 |
| 2000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 64.3 | 117.7 | 51.9 | 66.3 | 9 | 17.4 | 0.5 | 37.1 | 364.2 | 30.4 | 12 |
| 2001 | 2.4 | 0.3 | 26.3 | 33.5 | 18.8 | 42.4 | 71.9 | 97 | 137.7 | 8.3 | 0.4 | 16.7 | 455.7 | 38 | 12 |
| 2002 | 47.2 | 24.8 | 0 | 0 | 28.5 | 109.4 | 212.6 | 110.3 | 131.5 | 95.4 | 47.2 | 0 | 806.9 | 67.2 | 12 |
| 2003 | 4.4 | 1.4 | 0 | 0 | 41 | 97.8 | 169.5 | 116.4 | 174.8 | 60.7 | 0.3 | 0 | 666.3 | 55.5 | 12 |
| 2004 | 38.8 | 2.5 | 35.2 | 0.8 | 83.2 | 188.4 | 103.8 | 86.6 | 106.9 | 5.4 | 0.1 | 0 | 651.7 | 54.3 | 12 |
| 2005 | 0 | 45.3 | 10.8 | 0 | 31.8 | 31 | 55.6 | 126.6 | 41.9 | 1 | 0.8 | 2.4 | 347.2 | 28.9 | 12 |
| 2006 | 4.2 | 0.5 | 0 | 2.4 | 48.4 | 26.6 | 69.7 | 83.9 | 130.4 | 73.8 | 20 | 11.7 | 471.6 | 39.3 | 12 |
| 2007 | 21.9 | 14.7 | 0 | 0.5 | 18.6 | 234 | 178 | 40.5 | 38.1 | 7.7 | 3.7 | 0 | 557.7 | 46.5 | 12 |
| 2008 | 0 | 3 | 0 | 17.3 | 12 | 43 | 176.6 | 282.3 | 88.2 | 0 | 0 | 0 | 622.4 | 51.9 | 12 |
| 2009 | 0 | 0 | 0 | 1.8 | 15.1 | 95.9 | 19.5 | 101.1 | 63.1 | 26.4 | 30 | 9.2 | 362.1 | 30.2 | 12 |
| 2010 | 35.9 | 97 | 0 | 0.8 | 7.5 | 58.4 | 128.6 | 34.1 | 83.8 | 0 | 0 | 0 | 446.1 | 37.2 | 12 |
| 2011 | 0 | 0 | 0 | 3.8 | 3.5 | 60 | 35.6 | 42.5 | 83 | 25.1 | 0 | 0 | 253.5 | 21.1 | 12 |
| 2012 | 9 | 50.2 | 0.4 | 0 | 4.2 | 46.7 | 169.5 | 38.1 | 90 | 3.5 | 0.2 | 8.7 | 420.5 | 35 | 12 |
| 2013 | S/D | 0 | 0 | 0 | 24.2 | 119.1 | 230.8 | 66.6 | 141.4 | 38.5 | 31.4 | 67.5 | 719.5 | 65.4 | 11 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|------|
| MINIMA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 19.5 | 13.5 | 6.4 | 0 | 0 | 0 | 253.5 | 21.1 |
| MAXIMA | 183.4 | 97 | 35.2 | 43.6 | 126 | 234 | 519.2 | 282.3 | 188.9 | 120.6 | 68.5 | 67.5 | 817.1 | 68.1 |
| MEDIA | 17.792 | 10.269 | 2.9477 | 7.3 | 22.993 | 76.809 | 122.32 | 100.61 | 84.052 | 32.37 | 9.9907 | 9.4772 | 495.7 | 41.7 |
| ESTANDA R | 31.398 | 19.301 | 7.5897 | 11.817 | 24.815 | 54.58 | 91.361 | 54.251 | 48.307 | 33.791 | 15.472 | 14.613 | 133.02 | 11.6 |

A-3. ARREGLO DIPOLO-DIPOLO BIDIMENSIONAL. CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO CON 24 ELECTRODOS

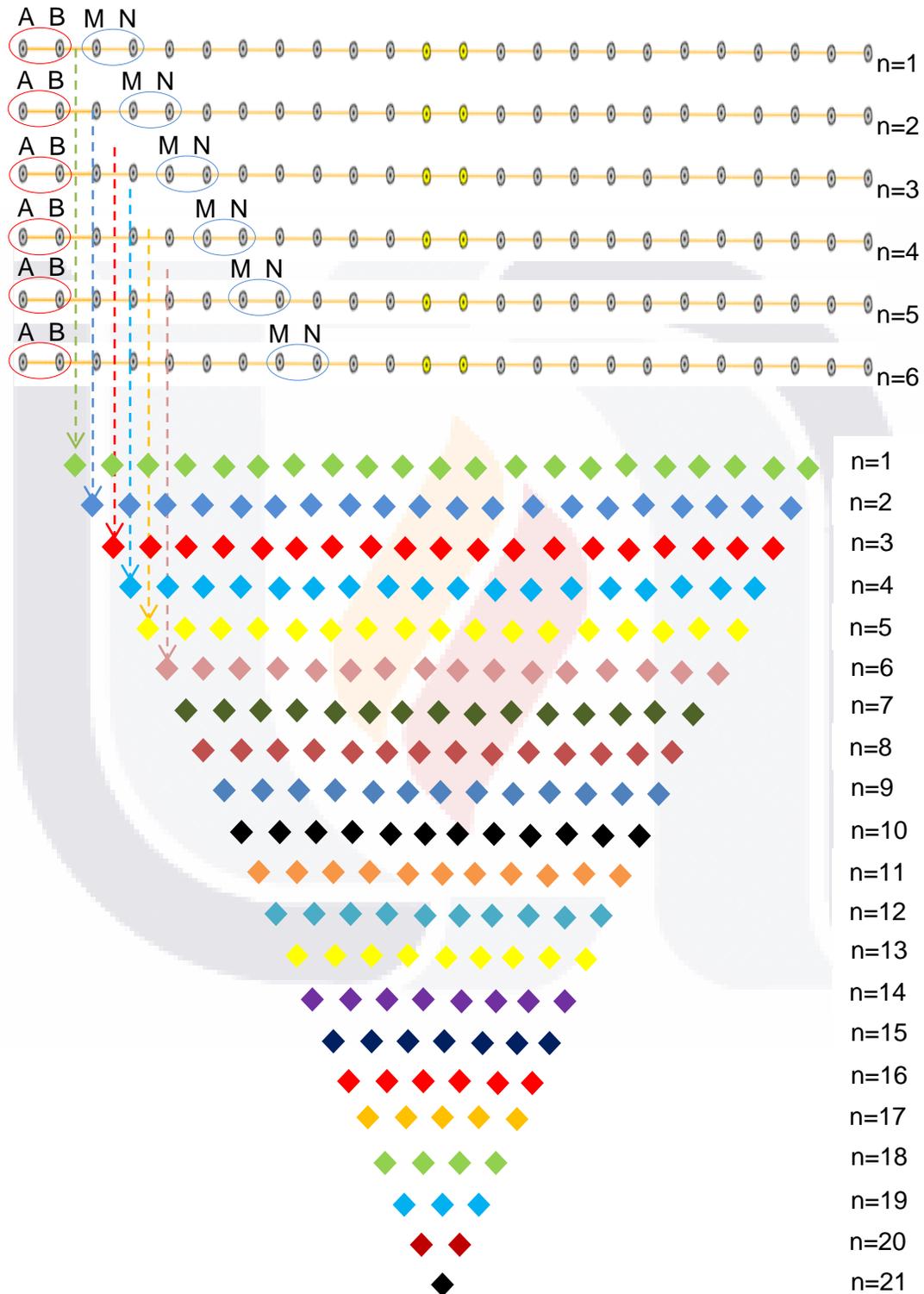
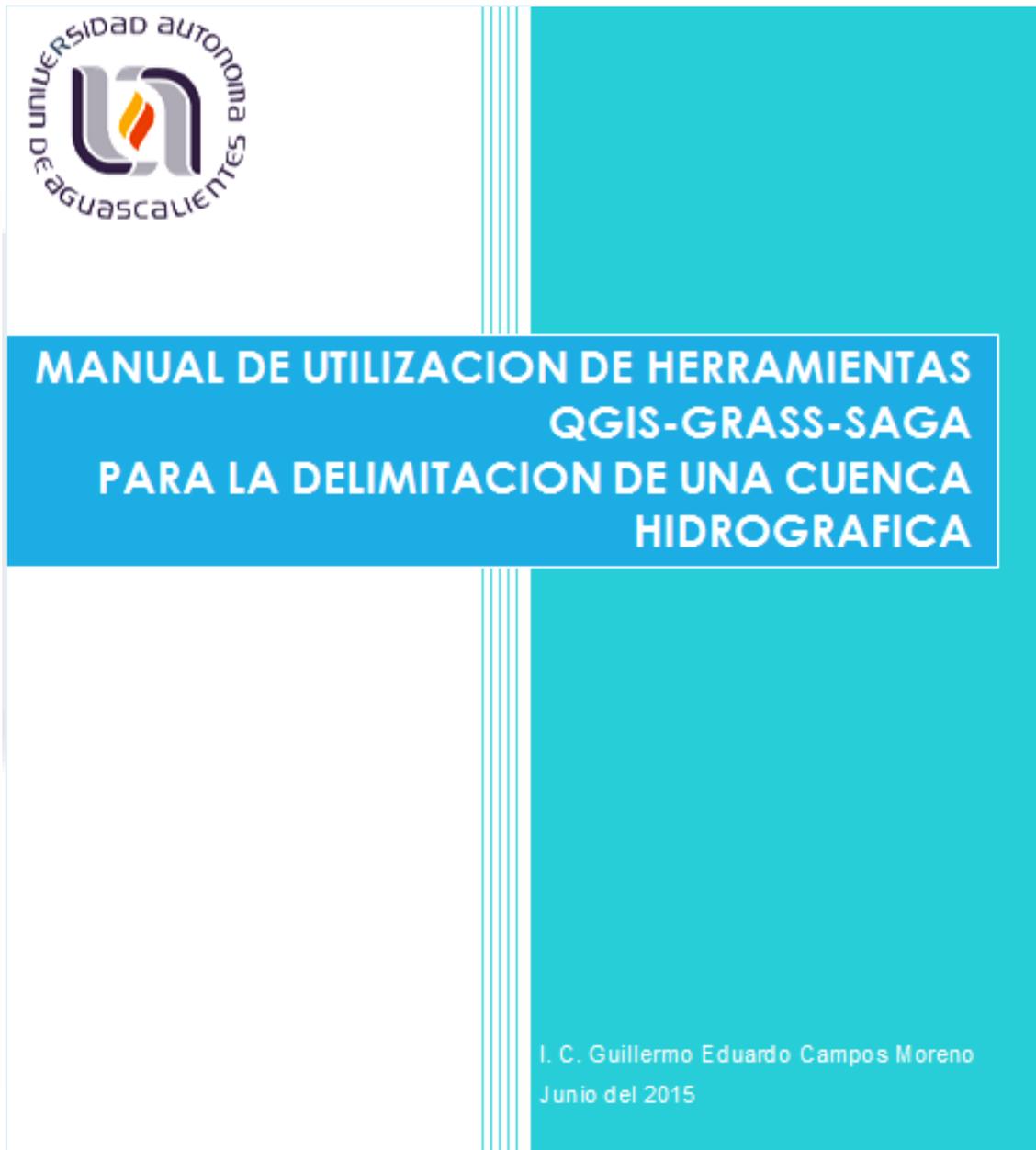


Figura. Medidas de arreglo Dipolo-Dipolo con 24 electrodos

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

A-4. MANUAL DE UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS DE QGIS-GRASS-SAGA PARA LA DELIMITACION DE UNA CUENCA HIDROGRÁFICA



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

INTRODUCCIÓN

QGIS es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de Código Abierto licenciado bajo GNU - General Public License. QGIS es un proyecto oficial de Open Source Geospatial



Foundation (OSGeo). QGIS ofrece muchas funcionalidades SIG comunes prestados por las características principales y complementos. Un breve resumen de las seis categorías generales de características y complementos se presenta a continuación:

1-VER DATOS

Se puede ver y sobreponer datos vectoriales y ráster en diferentes formatos y proyecciones sin convertir a un formato interno o común. Los formatos admitidos incluyen:

- Tablas y vistas habilitadas para operaciones espaciales utilizando PostGIS, SpatiaLite y MS SQL Spatial, Oracle Spatial, formatos vectoriales admitidos por la biblioteca OGR instalada, incluyendo archivos shape de ESRI, MapInfo, SDTS, GML y muchos más.
- Ráster y formatos de imágenes admitidos por la biblioteca GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) instalada, por ejemplo GeoTIFF, ERDAS IMG, ArcInfo ASCII GRID, JPEG, PNG y muchos más.
- Ráster GRASS y datos vectoriales de base de datos GRASS (location/mapset).
- Datos espaciales en línea servidos como servicios web OGC incluyendo WMS, WMTS, WCS, WFS, y WFS-T.

2-EXPLORAR DATOS Y COMPONER MAPAS

Se puede componer mapas y explorar datos espaciales interactivamente con una GUI amigable. Las muy útiles herramientas disponibles en la GUI incluyen:

- Explorador QGIS
- Reproyección al vuelo
- Gestor de Base de Datos
- Diseñador de mapas

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

- Panel de vista general
- Marcadores espaciales
- Herramientas de anotaciones
- Identificar/seleccionar objetos espaciales
- Editar/ver/buscar atributos
- Etiquetas definidos por los datos de elementos.
- Vectores definidos por datos y herramientas para simbología raster.
- Composición del atlas y mapa con capas de cuadrícula.
- flecha barra de escala y etiqueta de derechos de autor para mapas
- Apoyo para guardar y restaurar proyectos

3-CREAR, EDITAR, GESTIONAR Y EXPORTAR DATOS

Puedes crear, editar, manejar y exportar capas de vectores y raster en diferentes formatos. Iqgl ofrece lo siguiente:

- Herramientas de digitalización para formatos reconocidos OGR y capas vectoriales GRASS
- Capacidad para crear y editar archivos shape y capas vectoriales GRASS
- Complemento de georeferenciador para geocodificar imágenes
- Herramienta GPS para importar y exportar formato GPX y convertir otros formatos GPS a GPX o descargar o subir directo a la unidad GPS (en Linux, usb se agregado a la lista de objetos GPS.)
- Apoyo para visualizar y editar datos de OpenStreetMap
- Capacidad para crear tablas de base de datos espaciales desde archivos shape con el complemento de Administrados de BBDD
- Mejor manejo de tablas de bases de datos espaciales
- Herramientas para la gestión de tablas de atributos vectoriales
- Opción para guardar capturas de pantalla como imágenes georeferenciadas
- Herramienta para exportar DXF con capacidades aumentadas de explorar estilos y plugins que realizan funciones parecidas a CAD.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

4-ANALIZAR DATOS

Puedes realizar análisis de datos espaciales en bases de datos espaciales y otros formatos apoyados por OGR. Actualmente ofrece análisis de vectores, muestras, geoprocésamiento, geometría y herramientas de manejo de bases de datos. También puedes usar las herramientas integradas GRASS incluyen funcionalidad completa con GRASS y más de 400 modelos.

5-PUBLICAR MAPAS EN INTERNET

QGIS se puede utilizar como un WMS, WMTS, WMS-C o cliente WFS-T, y como servidor WMS, WCS o WFS. Además, se pueden publicar sus datos en Internet utilizando un servidor web con UMN MapServer o GeoServer instalado.

6-EXTENDER FUNCIONALIDADES QGIS A TRAVEZ DE COMPLEMENTOS

QGIS se puede adaptar a sus necesidades especiales con la arquitectura de complemento extensible y bibliotecas que se pueden utilizar para crear complementos. Se puede incluso crear nuevas aplicaciones con C++ o Python.

OBJETIVO DEL MANUAL

Dentro de las múltiples funciones con las que puede ser utilizado el software denominado QGIS se encuentra la función de delimitación de cuencas hidrológicas con la ayuda de sus complementos de software llamados GRASS y SAGA. Este manual tiene como objetivo brindar a el usuario un algoritmo claro de análisis de la utilización de las herramientas de QGIS y sus complementos GRASS y SAGA para la delimitación de una cuenca hidrológica, para la posterior extracción ya sea de sus propiedades geométricas (área, perímetro, pendiente, etc.), o sus propiedades hidrológicas (ubicación de sus corrientes, longitud de las corrientes, etc.), para su posterior utilización en algún proyecto.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

PASOS PARA DELIMITAR UNA CUENCA HIDROGRAFICA A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN UTILIZANDO LOS SOFTWARES QGIS-GRASS-SAGA

1-DESCARGA DEL CLIPPER DEL AREA DE ANALISIS

A continuación se muestran los pasos necesarios para descargar el MDE del área de análisis desde la plataforma de INEGI:



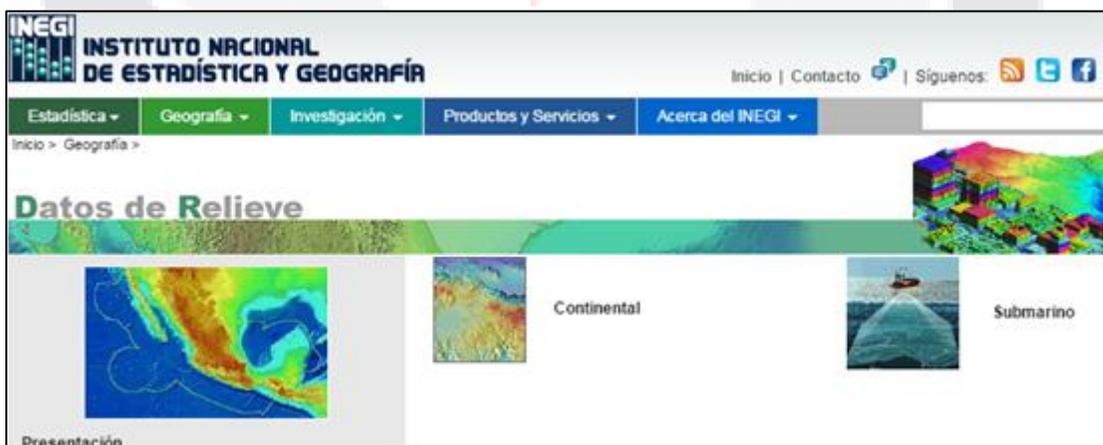
Se ingresa a la página www.inegi.org.mx

Se abren las pestañas de:

Geografía → Temas → Datos de Relieve



Se elige la zona donde se encuentre el área de análisis, ya sea **Continental** o **Submarino** según sea su ubicación. En este caso se elegirá la opción de **Continental**.



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes



Para este caso se elegirá la opción de **Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0**

Datos de Relieve

Continental

Productos y servicios

- Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) - descarga
- Modelos Digitales de Elevación tipo Terreno con 5 metros de resolución
- Modelos Digitales de Elevación tipo Superficie con 5 metros de resolución
- Modelo Digital de Elevación con 3 metros de resolución de la zona potencialmente afectable por el volcán Popocatepetl - 2013

Aspectos metodológicos

- Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción
- ▶ Metadatos

Se elige la opción **Descargar**.

Datos de Relieve

Continental

Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0

Definición

El Continuo de Elevaciones Mexicano, mediante valores por coordenadas (X, Y) espaciados y distribuidos

- [Definición](#)
- [Objetivo](#)
- [Antecedentes](#)
- [Ventajas](#)
- [Aplicaciones del CEM en el INEGI](#)
- [Características](#)
- [Descargar](#)

La página da cuatro opciones de descarga del MDE:

- Descarga MDE nacional
- Descarga MDE estatal
- Descarga MDE de área definida por el usuario
- Descarga MDE carta topográfica 1:50,000

Datos de Relieve

Continental

Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) - descarga

Descarga

1 Seleccione la resolución
1km 3km 5m 10m 15m 30m

2 Seleccione la cobertura geográfica
Área definida por el usuario

3 Seleccione herramienta Dibujar área localizada a la derecha del mapa

4 Dibuje un rectángulo sobre el mapa

Nota: El área máxima para la descarga se ajustará según la resolución, observe el dato en la esquina inferior izquierda del mapa

5 De clic en la liga para iniciar la descarga

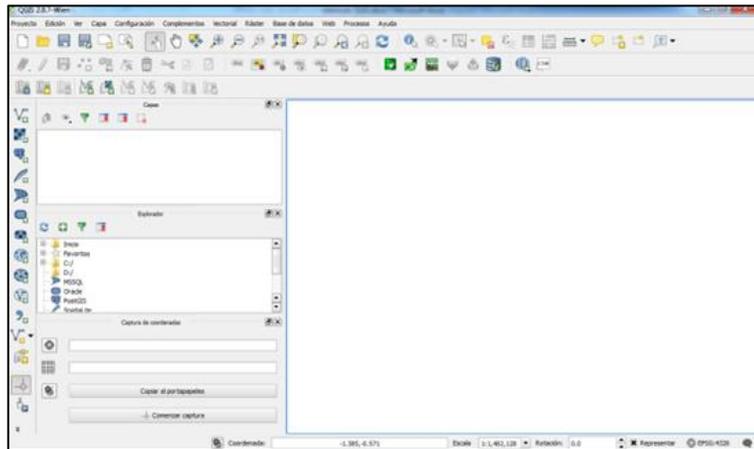
[Descargar CEM](#) [Descargar sombreado](#)

[Visualizar área de descarga en 3D](#)

Una vez elegida el área se da un click en **Descargar MDE** para que comience la descarga.

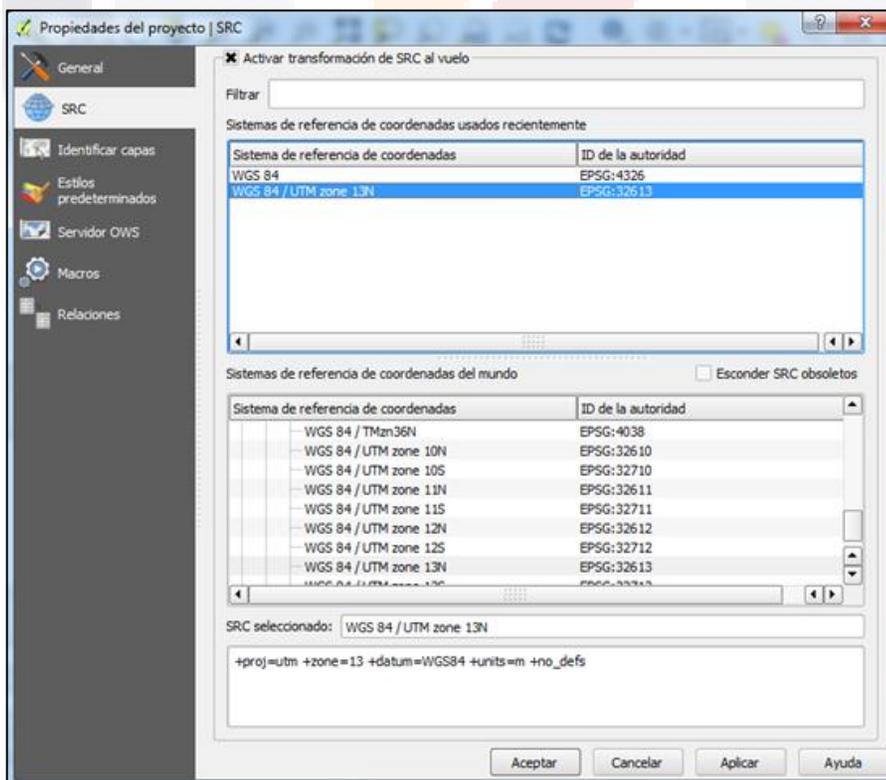
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

2-ABRIR QGIS



3-CONFIGURACION DEL SRC

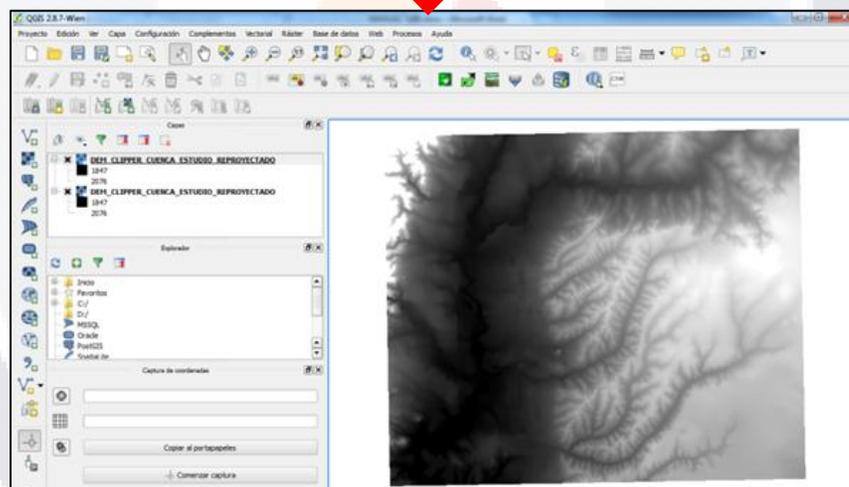
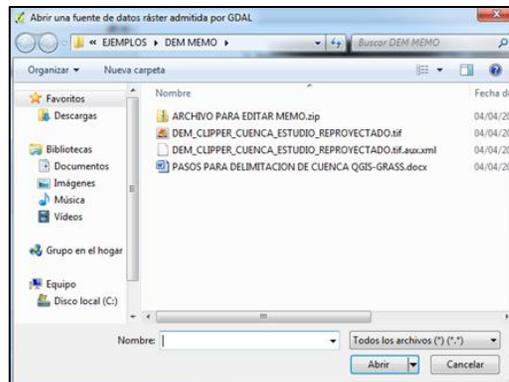
En la parte inferior derecha configurar el SRC, para Aguascalientes colocamos la zona WGS84/UTM zone 13N



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

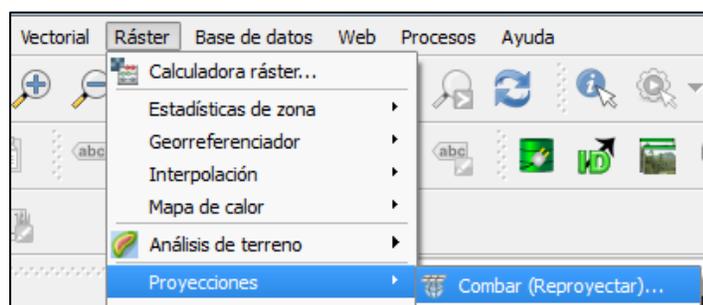
4-ABRIR MDE, DESCARGADO DE INEGI

En la parte superior izquierda se da un click sobre la opción  (Añadir capa raster). A continuación se busca la carpeta donde se haya guardado el DEM descargado de INEGI (Paso I)



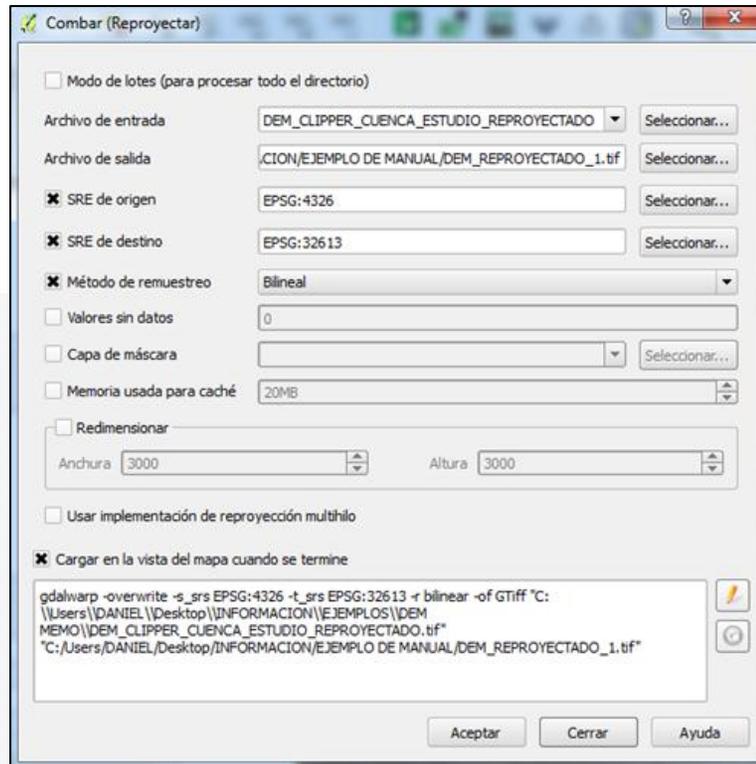
5-REPROYECTAR EL MDE

Se reproyecta el MDE para trabajar en las coordenadas deseadas y es con el que se trabajará.

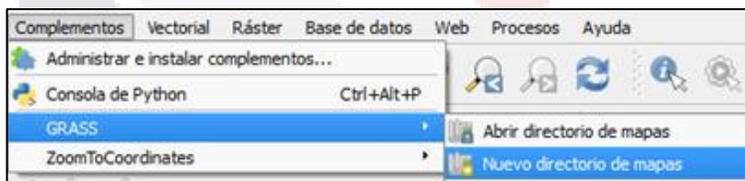


Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

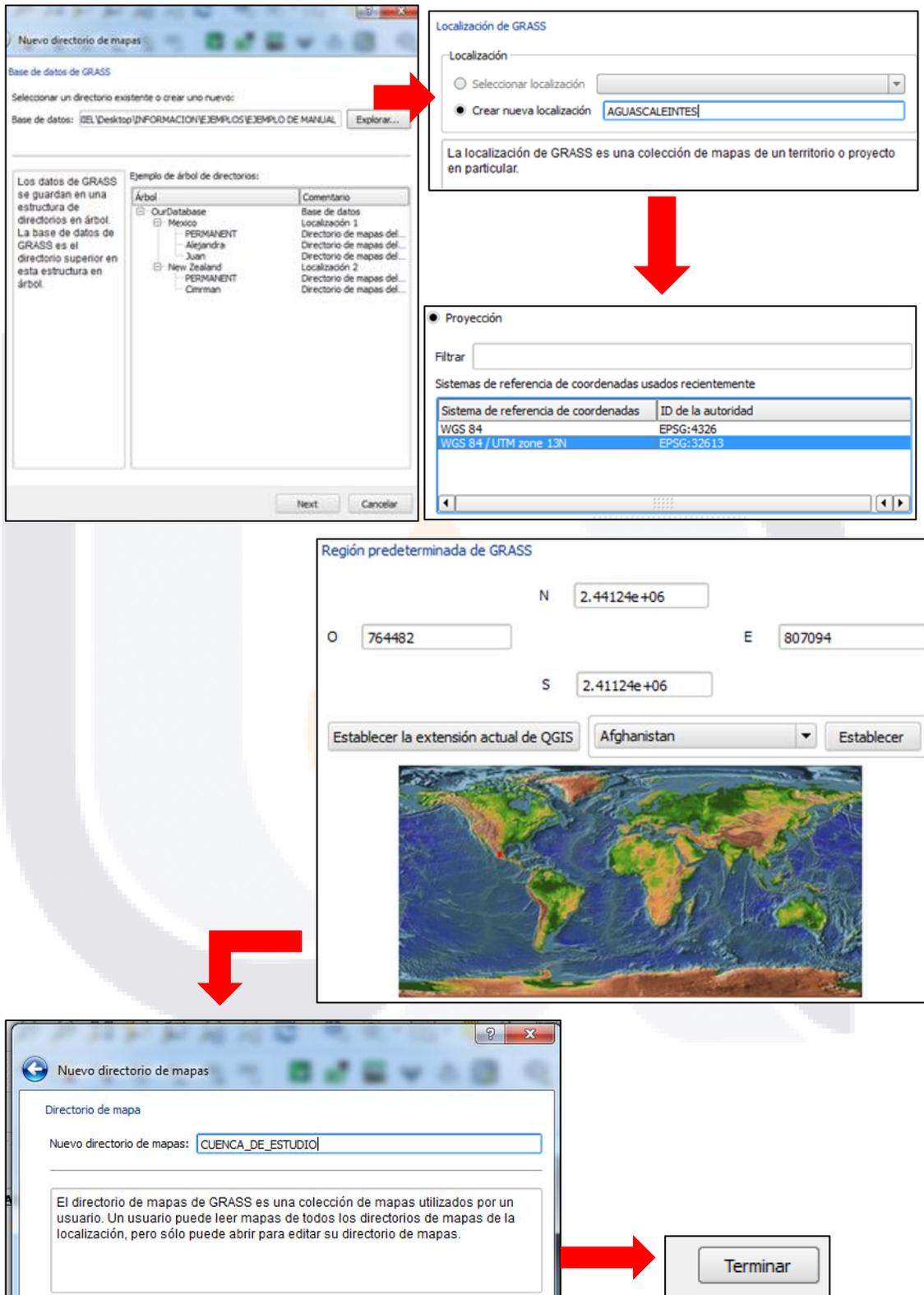
El archivo de SRE de origen es la carpeta donde se desea guardar el MDE reproyectado.



6-CREAR UN NUEVO DIRECTORIO DE MAPAS EN GRASS

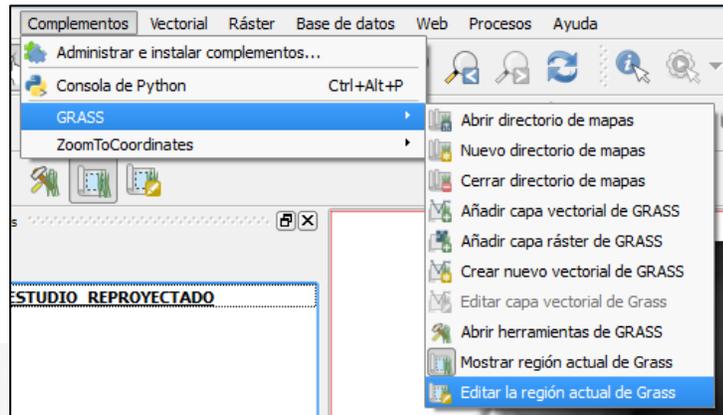


Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

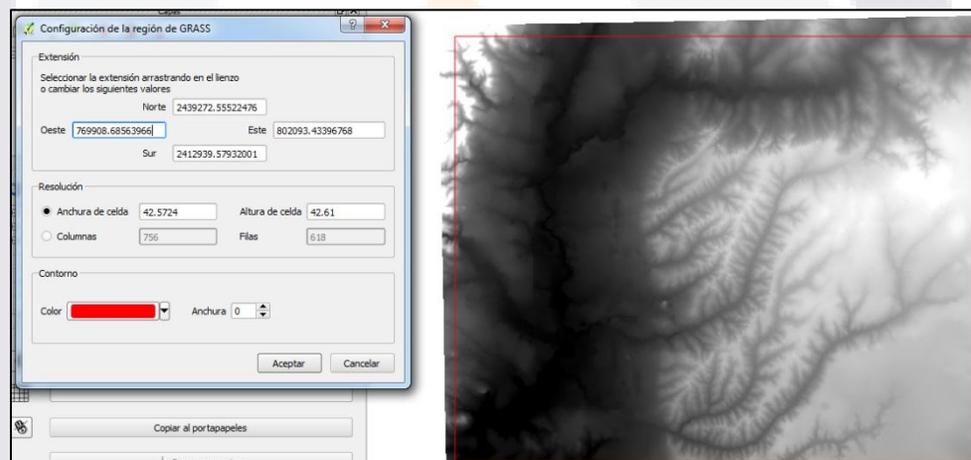


Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

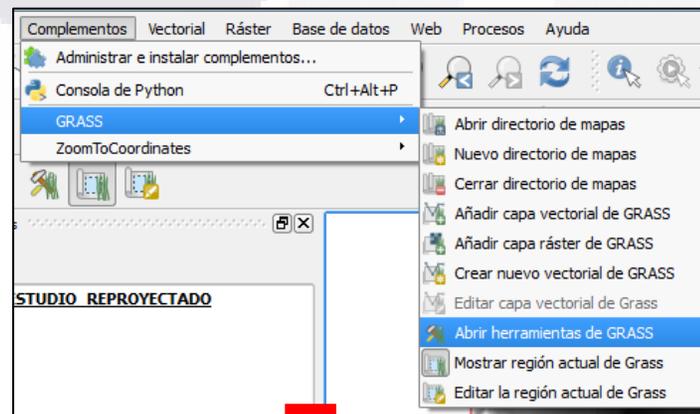
7-EDITAR REGION ACTUAL DE GRASS



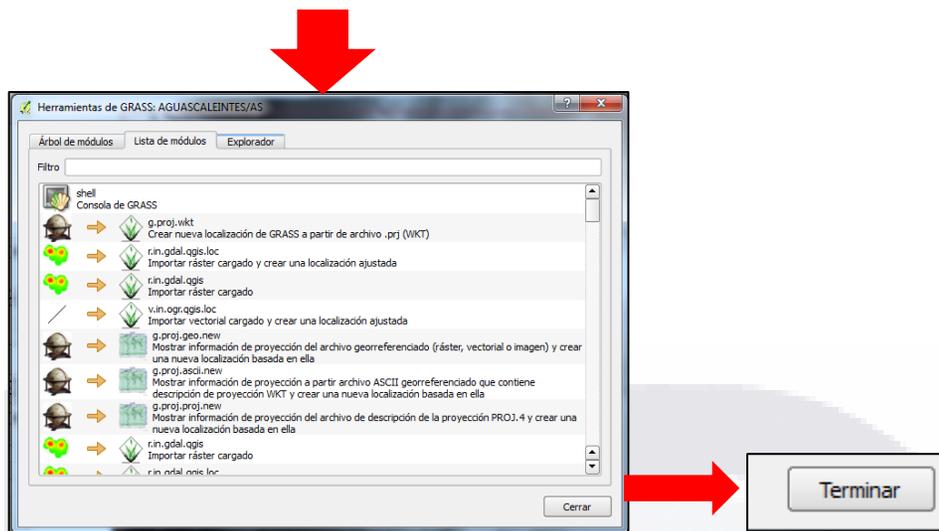
Con el cursor se selecciona el área de trabajo y se da click en aceptar. El área seleccionada aparecerá con su perímetro en color rojo.



8-ABRIR HERRAMIENTAS DE GRASS

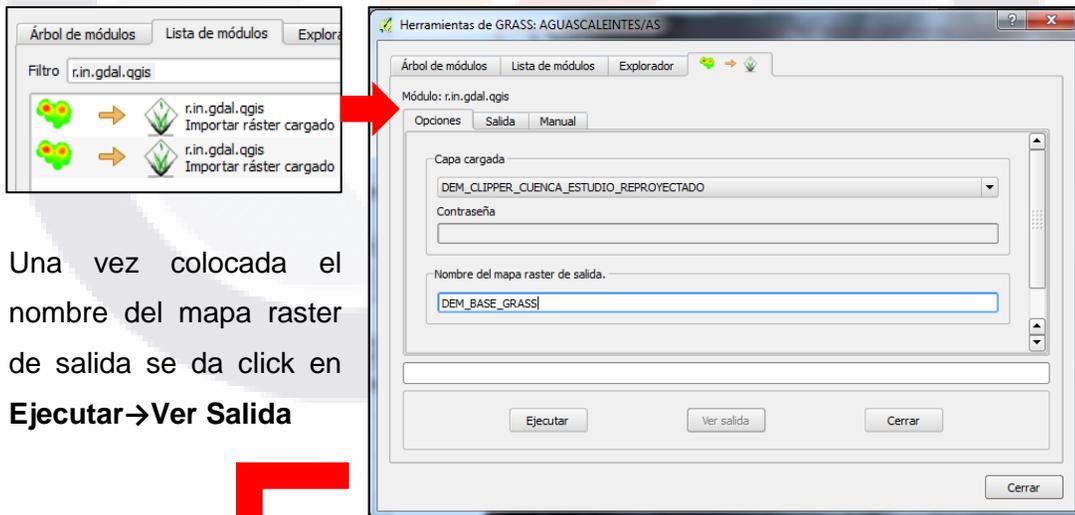


Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

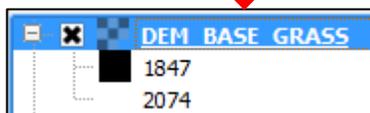


a-IMPORTAR RASTER CARGADO (IMPORTACION DE RASTER DE QGIS A GRASS)

En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **r.in.gdal.qgis**.



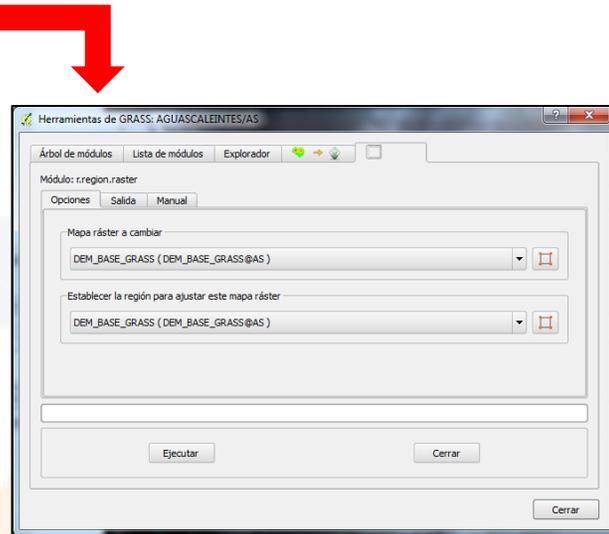
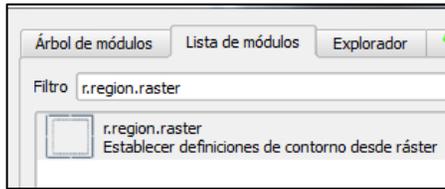
Una vez colocada el nombre del mapa raster de salida se da click en **Ejecutar→Ver Salida**



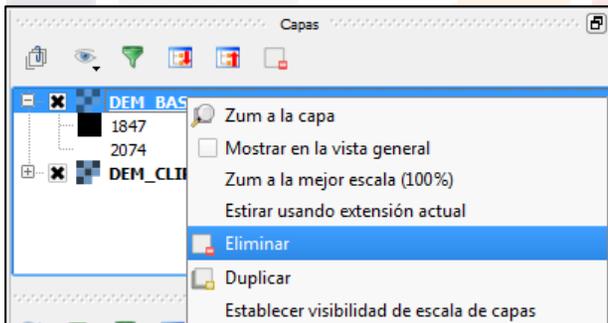
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

b-ESTABLECER DEFINICIONES DE CONTORNO DESDE RASTER

En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **r.region.raster**.

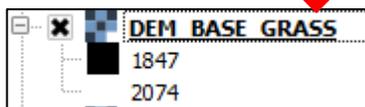
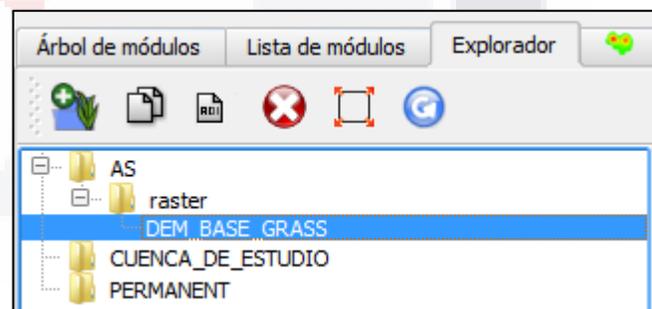


Una vez seleccionada la región para ajustar el mapa ráster se da click en **Ejecutar**.



Realizado este paso se elimina la capa **DEM_BASE_GRASS**

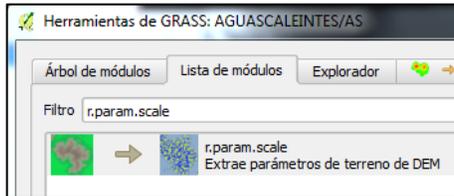
Añadir de nuevo la capa **DEM_BASE_GRASS**



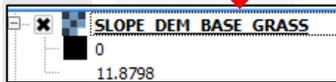
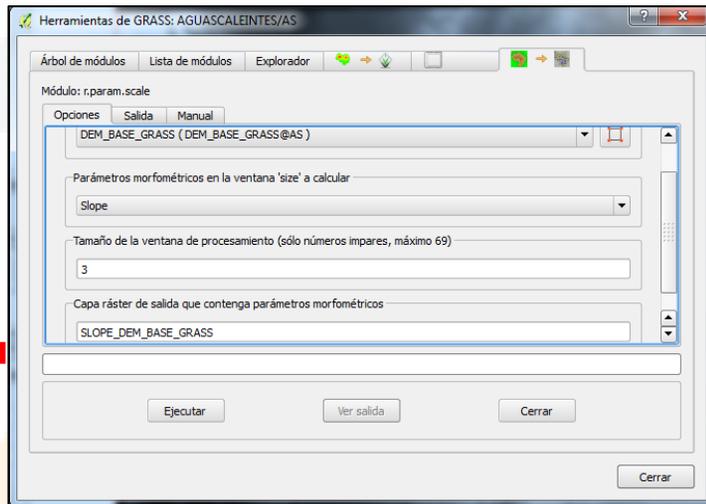
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

c-EXTRAE PARAMETROS DE TERRENO DE MDE

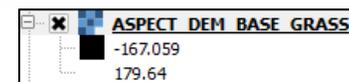
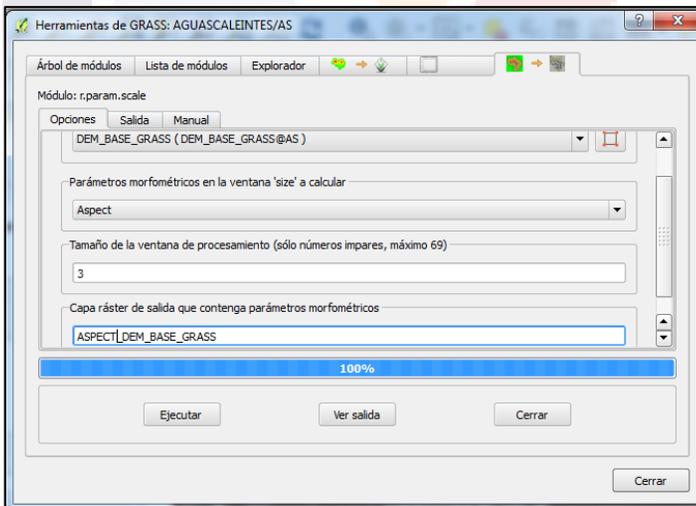
En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **r.param.scale**.



Una vez colocada el nombre del carácter de salida se da click en **Ejecutar → Ver Salida**



Una vez colocada el nombre del carácter de salida se da click en **Ejecutar → Ver Salida**



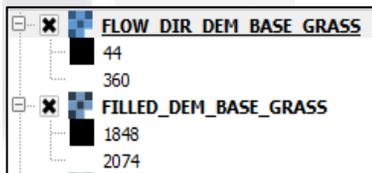
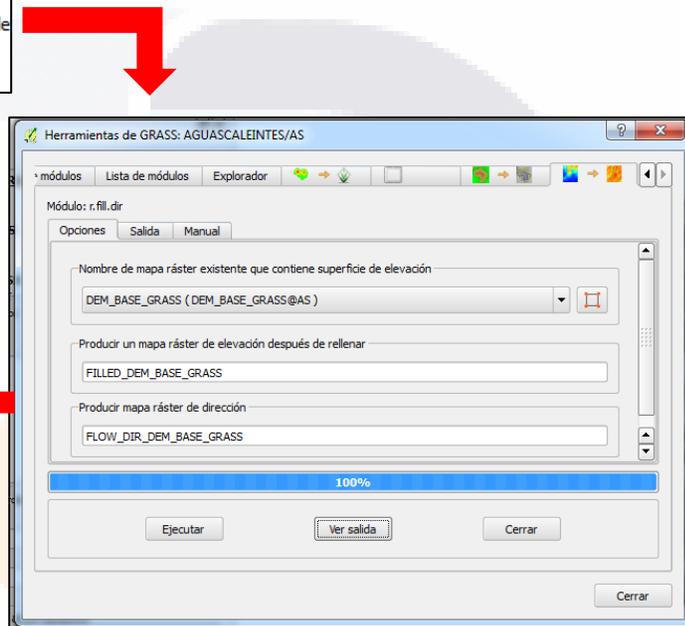
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

d-FILTRAR Y CREAR MAPA DE ELEVACIONES SIN DEPRESIONES Y MAPA DE DIRECCION DE FLUJO A PARTIR DE RASTER DE ELEVACIONES

En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **r.fill.dir**.



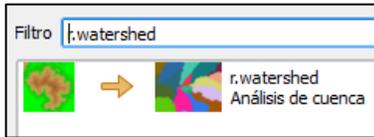
Una vez colocada el nombre del carácter de salida se da click en **Ejecutar** → **Ver Salida**



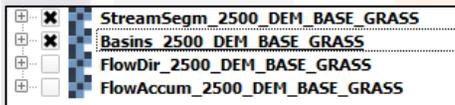
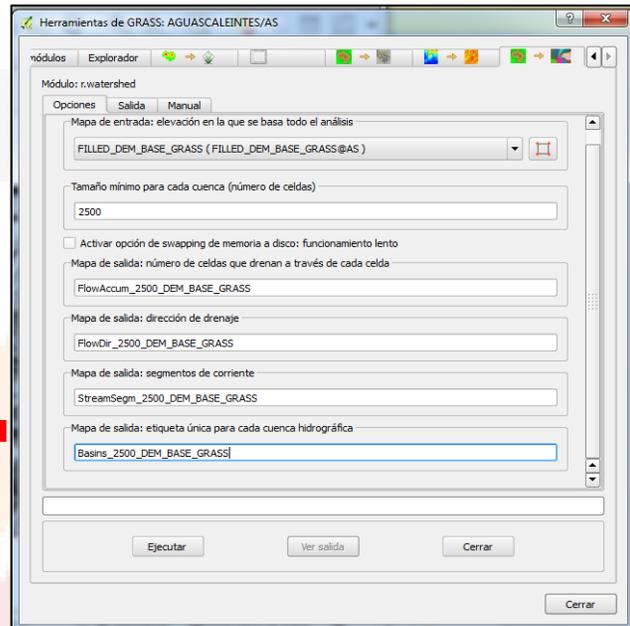
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

e- ANALISIS DE LA CUENCA

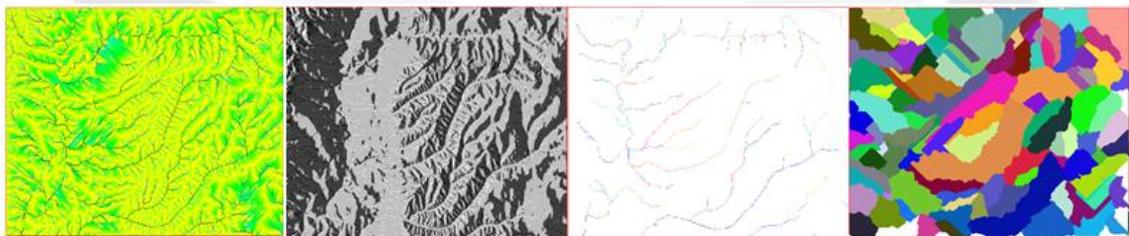
En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **r.watershed**.



Una vez colocada el nombre del carácter de salida se da click en **Ejecutar → Ver Salida**



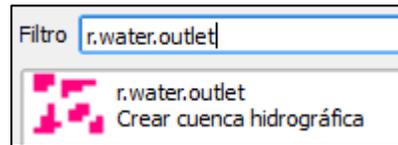
Se puede variar según las necesidades el tamaño mínimo de las cuencas. A continuación se muestran las capas que se crean con esta herramienta



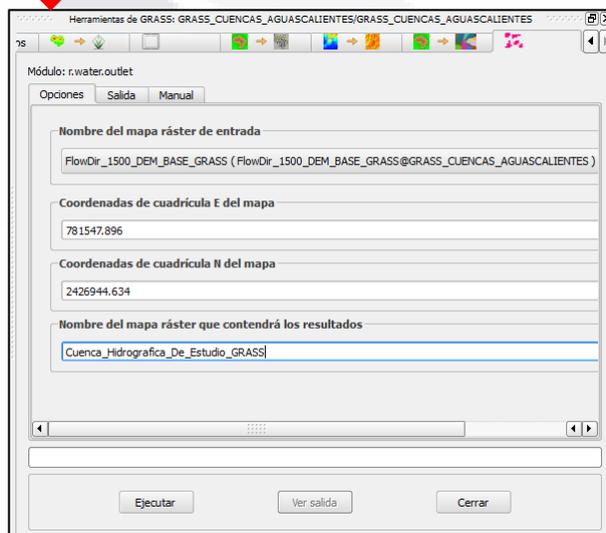
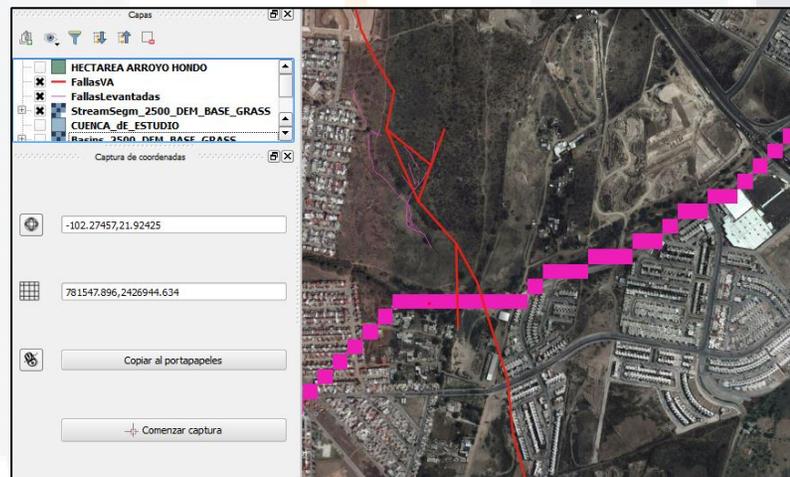
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

f-CREAR CUENCA HIDROGRAFICA

En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **r.water.outlet**.



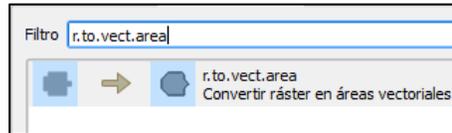
Se hace la captura de coordenadas en el cauce, a partir de donde se extraerá la parte de la cuenca correspondiente. Dado que en este estudio se pretende utilizar los escurrimientos superficiales hasta las fallas con potencial de recarga, se capturan las coordenadas en ese punto.



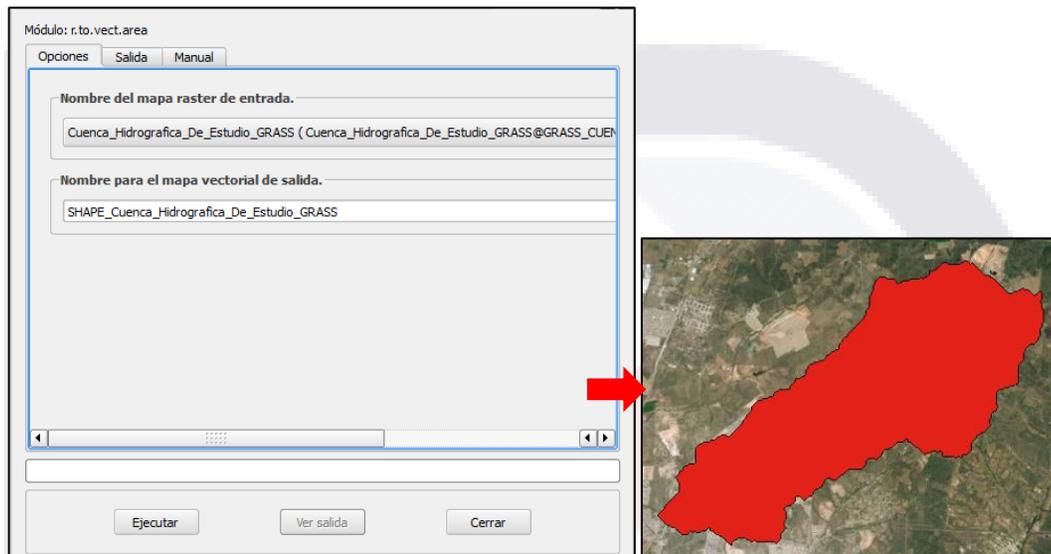
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

g-CONVERTIR RASTER EN AREAS VECTORIALES

En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **r.to.vect.area**.



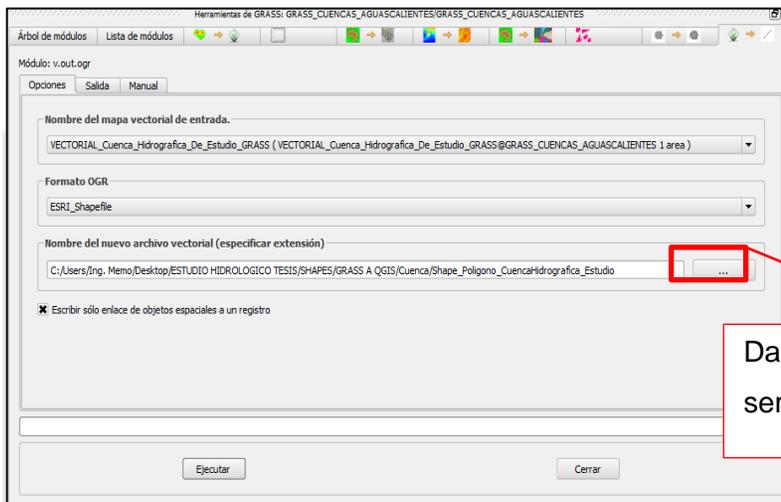
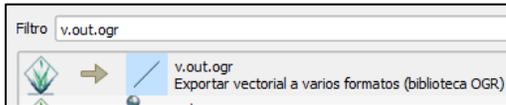
Una vez colocada el nombre del mapa vectorial se da click en **Ejecutar → Ver Salida**



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

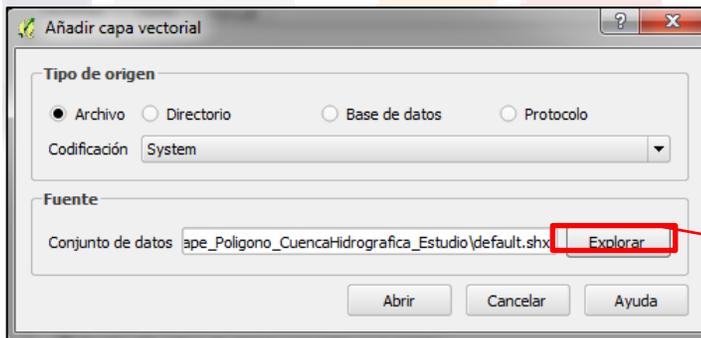
h-EXPORTAR VECTORIAL A VARIOS FORMATOS (BIBLIOTECA OGR)

En la pestaña de Filtro colocar el siguiente código para seleccionar la herramienta **v.out.ogr**.

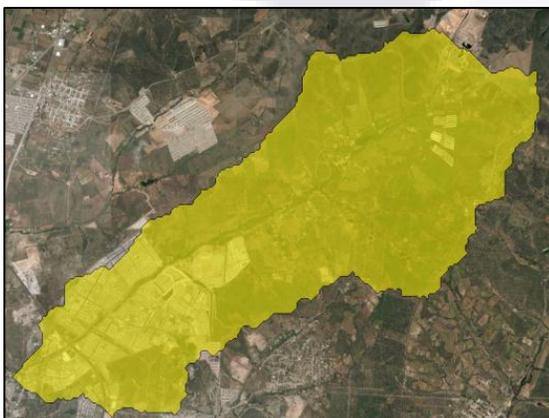


Dar ubicación (ruta) donde serán guardados.

Se abre el Shapefile creado anteriormente a partir de la ruta dada



Dar ubicación (ruta) donde fueron guardados



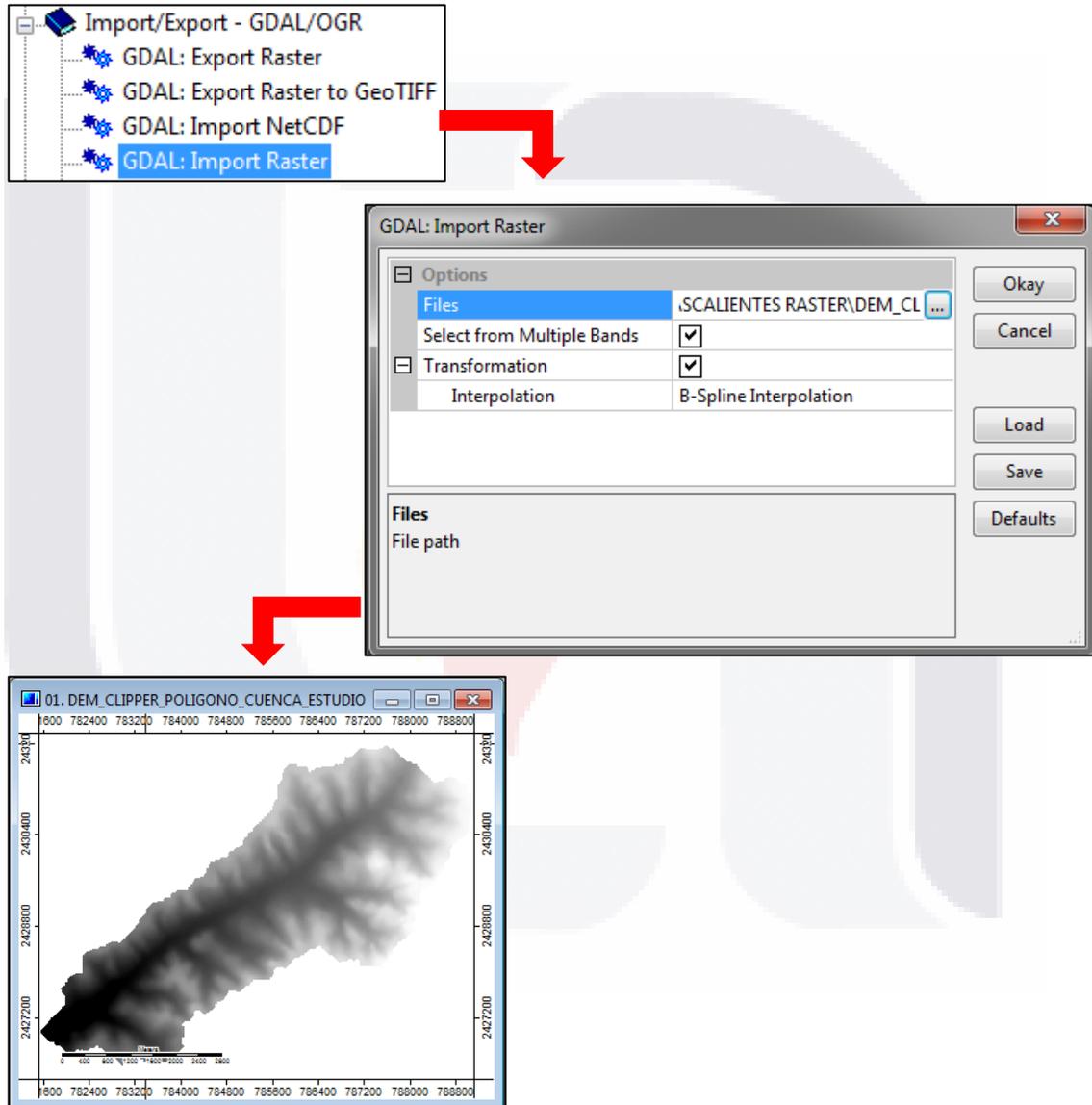
Una vez que el archivo es vectorizado y exportado a QGIS se pueden obtener diferentes parámetros geométricos o hidrológicos mediante la edición de sus propiedades.

Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

11-ABRIR DEM (UTILIZANDO SAGA GIS)

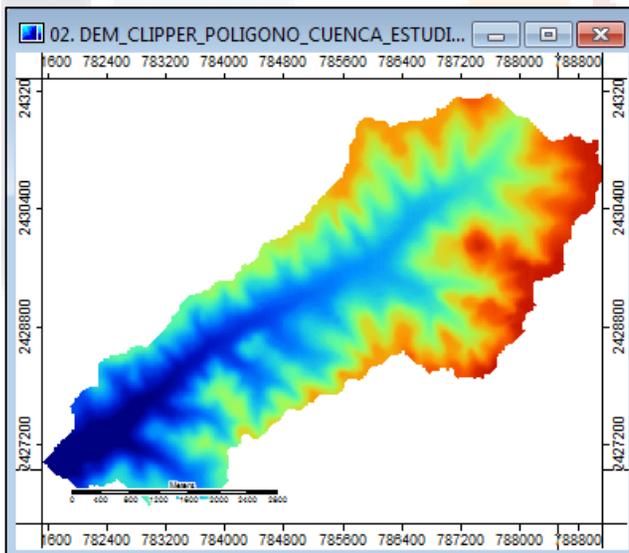
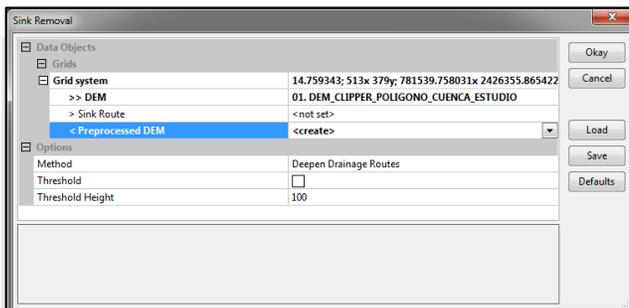
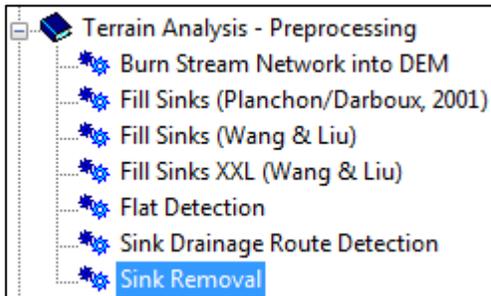
El programa computacional SAGA GIS, también permite determinar aspectos geomorfológicos de la cuenca, como por ejemplo: curvas de nivel, curva hipsométrica, cauces, entre otros.

A continuación se carga el MDE de la cuenca:



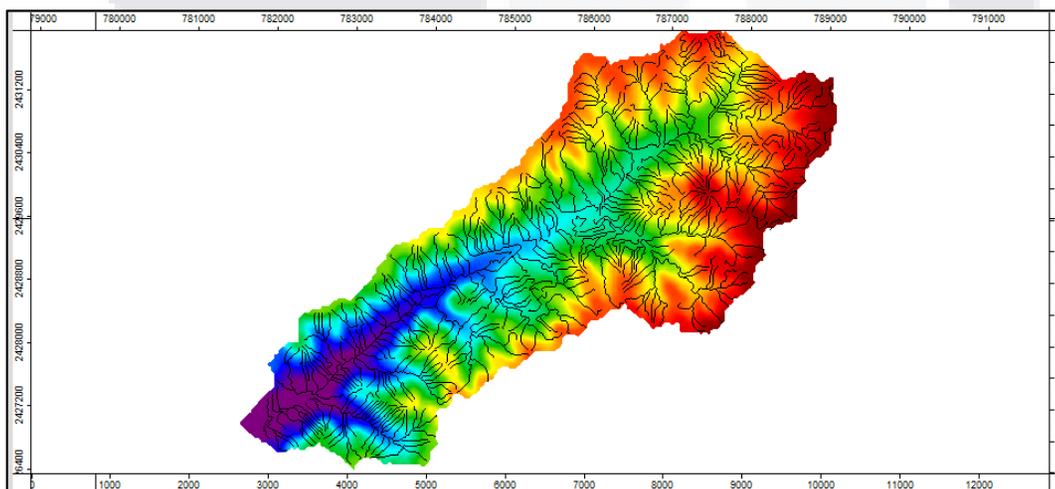
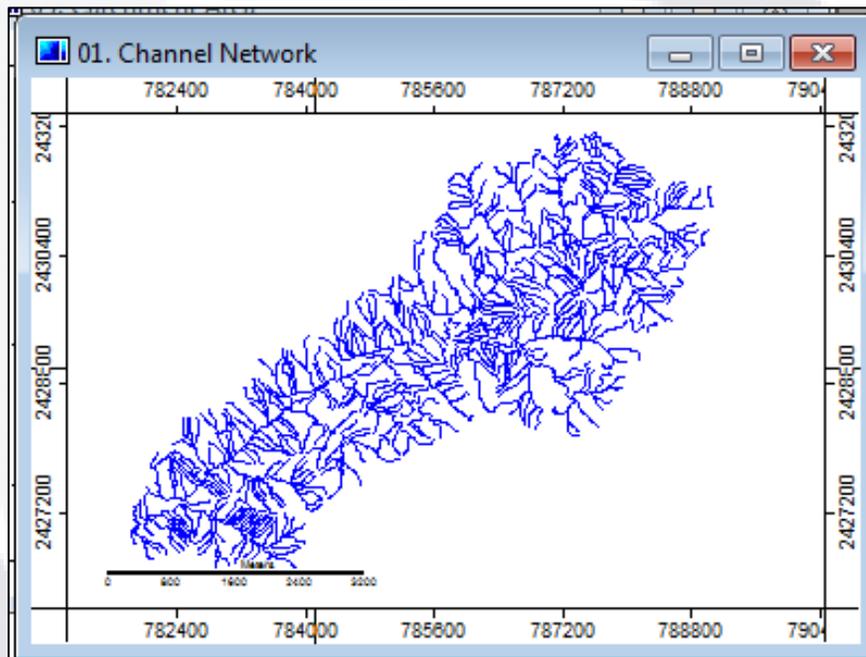
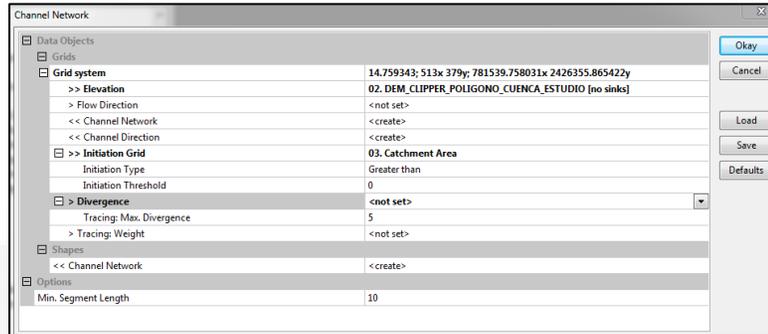
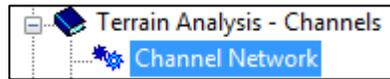
Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

12-SINK REMOVAL (SAGA)



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

14-CHANNEL NETWORK (SAGA)



Estimación del volumen de escurrimiento y su potencial de infiltración a través de una discontinuidad geológica en el valle de Aguascalientes

15-VISTA EN 3D

