UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“SIEMBRA DE AGUA”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

PRESENTA

JOAQUÍN PÉREZ VALERA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. ALEJANDRA CORTÉS SILVA

MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2011

Universidad Nacional Autónoma de México
UNAM
Biblioteca Central
Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mis padres que con mucho cariño, siempre están dándome su apoyo.

A mi hermana, que siempre me ha brindado su ayuda sin esperar nada a cambio. Sin su apoyo no estaría donde estoy.

AGRADECIMIENTOS

A Alejandra Cortés por brindarme su apoyo y darme la oportunidad de trabajar en su grupo de investigación

.

A mis compañeros y amigos del Grupo de Hidrología Isotópica. En particular a Juan Pérez Q. que siempre estuvo para retroalimentar mi trabajo.

A mis sinodales, por las observaciones y crítica constructiva hacia mi trabajo.

A los profesores que a través de más de 50 materias me han formado no sólo como ingeniero, sino como Universitario.

A mis amigos, que siempre han estado ahí para apoyarme cuando lo necesité, y mejor aún para divertirnos cuando la ocasión lo ameritaba. En especial César por enseñarme tanto de ingeniería práctica y de sentido común.

INDICE GENERAL

1. Justificación 1
2. Objetivo 4
3. Antecedentes 6
3.1. Recarga artificial 7
3.1.1. Métodos de recarga 8
3.1.1.1. Recarga Superficial 8
3.1.1.2. Recarga Superficial 9
3.1.1.2.1. Fosas 9
3.1.1.2.2. Trinchera de infiltración 9
3.1.1.2.3. Áreas de Biorretención 11
3.1.1.3. Recarga profunda 12
3.2. Marco normativo 13
3.2.1. NOM-015-CONAGUA-2007 13
3.2.2. Normatividad Asociada 16
3.2.2.1. NOM-003-CONAGUA-1996 16
3.3. Experiencia Previa 17
3.3.1. Infiltración de agua pluvial: Jardínes del Pedregal 17
3.3.2. Infiltración de agua residual tratada: Caso Lesser 18
4. Metodología propuesta 21
4.1. Metodología 22
4.2. Criterios de selección 25
4.2.1. Capacidad de Infiltración 25
4.2.1.1. Prueba Manual 26
4.2.2. Distancia Mínima a Fuentes de Abastecimiento 29
4.2.3. Fuentes Potenciales de Contaminación - HOTSPOTS 30
4.2.1. Área Disponible 30
4.2.2. Profundidad del nivel freático 31
4.2.3. Conos de abatimiento 32
4.2.4. Integración al paisaje 32

4.3. Dimensionamiento 33
4.3.1. Evento de Diseño 33
4.3.1.1. Período de retorno 33
4.3.1.2. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia 35
4.3.2. Metodología para el dimensionamiento 37
5. Estudio caso: León, Guanajuato. 43
5.1. Zona de Estudio 44
5.1.1. Ubicación 44
5.1.2. Fisiografía 46
5.1.3. Geomorfología 48
5.1.4. Geología Local 50
5.1.4.1. Sistema Jurásico 52
5.1.4.1.1. Piroxénita San Juan de Otates (Jpsj). 52
5.1.4.1.2. Conjunto Plutónico La Luz (Kcpl). 54
5.1.4.2. Cenozoico 55
5.1.4.2.1. Granito Comanja (tgco). 55
5.1.4.2.2. Andesita Bernalejo 55
5.1.4.2.3. Ignimbrita Cuatralba. 56
5.1.4.2.4. Basalto Dos Aguas (Tbda) 56
5.1.4.2.5. Terciario Granular Indiferenciado (Tgi) 56
5.1.4.3. Cuaternario 57
5.1.4.3.1. Gabro Arperos 57
5.1.4.3.2. Basalto El Cubilete 57
5.1.4.3.3. Aluvión 58
5.1.5. Meteorología y Clima 58
5.1.6. Hidrografía 58
5.1.6.1. Subcuencas 58
5.2. Problemática 59
5.2.1. Hidrología Urbana 59
5.2.1.1. Puntos conflictivos 59

6. Sitio propuesto 67
6.1. Área disponible 68
6.2. Cercanía a pozos de extracción 68
6.3. Profundidad del nivel freático 70
6.4. Propuesta piloto 70
6.4.1. Revisión geológica y estratigráfica 70
6.4.1.1. Geofísica 71
6.4.2. Consideraciones 71
6.4.2.1. Capacidad de infiltración 72
6.4.2.1.1. Descripción del suelo encontrado 76
6.4.2.1.2. Conclusiones de la prueba de infiltración 77
6.4.2.2. Evento de diseño 77
6.4.2.3. Zona de aportación 81
6.4.2.3.1. Captación y conducción 81
6.4.3. Dimensionamiento 83
6.4.3.1. Propuesta y dimensionamiento de la obra de infiltración 83
6.4.4. Caudal de infiltración 85
6.4.5. Monitoreo y etapa de prueba 85
6.5. Mantenimiento 86
6.6. Catálogo de conceptos 87
7. Conclusiones y recomendaciones 92
Anexos 96
A.1. Análisis hidrometeorológico 97
A.1.1. Orden y período de retorno 98
A.1.2. Distribuciones de probabilidad 99
A.1.2.1. Distribución Normal 100
A.1.2.2. Distribución LogNormal 100
A.1.2.3. Distribución Gumbel 101
A.1.2.4. Distribución Pearson III 102
A.1.3. Obtención de la ecuación IDF 103

A.1.3.1. Ajuste estadístico de eventos de precipitación 103
A.1.3.1.1 Ajuste a probabilidad normal 105
A.1.3.1.2 Ajuste a probabilidad Lognormal 107
A.1.3.1.3 Ajuste a probabilidad Gumbel 109
A.1.3.1.4 Ajuste a probabilidad Pearson 111
A.1.3.2. Función de mejor ajuste 113
A.1.4. Ecuación IDF 113
A.2. Geología 114
A.2.1. Escala de tiempo geológico 114
A.2.2. Génesis de las rocas 114
A.2.2.1. Rocas ígneas 114
A.2.2.2. Rocas sedimentarias 115
A.2.2.3. Rocas metamórficas 117
A.2.3. Composición de las rocas 117
A.2.3.1. Rocas ígneas 117
A.2.3.2. Rocas sedimentarias 119
A.2.3.3. Rocas metamórficas 120
A.3. Permeámetro de Guelph 122
A.3.1. Modo de operación 124
A.3.1.1. Ecuaciones de análisis 124
A.3.1.2. Factor C 124
A.3.1.3. Análisis para una carga 125
A.3.1.4. Análisis para dos cargas 127
A.4. Planos 128
Bibliografía 129

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Fosa de recarga 10
Figura 3.2 Trinchera de infiltración 11
Figura 3.3 Esquema conceptual de un área de biorretención 12
Figura 3.4 Ubicación de pozos de recarga de agua tratada. 20
Figura 4.1 Diagrama de flujo para la implementación de dispositivos de infiltración artificial. 24
Figura 4.2 Esquema de un pozo para la prueba de infiltración. 28
Figura 4.3 Distancia al nivel freático. Elaboración propia. 32
Figura 4.4 Trinchera de infiltración ubicada en un estacionamiento. 33
Figura 4.5 Trinchera de infiltración ubicada en banqueta (1). 34
Figura 4.6 Trinchera de infiltración ubicada en banqueta (2). 35
Figura 4.7 Trinchera de Infiltración habilitada como jardinera (1). 36
Figura 4.8 Trinchera de Infiltración habilitada como jardinera (2). 38
Figura 4.9 Filtro de arena como lecho de infiltración (1). 39
Figura 4.10 Filtro de arena como lecho de infiltración (1). 40
Figura 4.11 Isoyetas de precipitación en el estado de Guanajuato para una tormenta de 5 minutos de duración con un período de retorno de 10 años. 41
Figura 4.12 Isoyetas de precipitación en el estado de Guanajuato para una tormenta de 10 minutos de duración con un período de retorno de 10 años. .. 42
Figura 4.13 Isoyetas de precipitación en el estado de Guanajuato para una tormenta de 20 minutos de duración con un período de retorno de 10 años. .. 42
Figura 5.1 Ubicación del municipio de León. 45
Figura 5.2 Mapa fisiográfico de la zona. 47
Figura 5.3 Falla normal 49
Figura 5.4 Columna estratigráfica de la zona. 63
Figura 5.5 Mapa geológico de la zona. 64
Figura 5.6 Esquema conceptual del acuífero de León. 65
Figura 5.7 Estaciones meteorológicas en el municipio de León, Guanajuato. 65
Figura 5.8 Subcuencas hidrológicas en el municipio de León, Gto. 66
Figura 6.1 Zona de inundación 8. Valle del Campestre: Colonia Valle del Campestre. 69
Figura 6.2 Ubicación del pozo Cd. 35 con respecto y su área de amortiguamiento con respecto a la zona de inundación # 8. 69
Figura 6.3 Fosa para de prueba de infiltración (1) 72
Figura 6.4 Llenado de la fosa para de prueba de infiltración (2) 73
Figura 6.5 Capacidad de infiltración vs tiempo (Duración de la prueba) 76

Figura 6.6 Ubicación de los sitios propuestos y de los pozos con información litoestratigráfica. 78
Figura 6.7 Corte litológico del pozo Las Hilamas. Cortesía CEAG. 79
Figura 6.8 Estratos más superficiales del corte litológico del pozo Ciudad 17. 80
Figura 6.9 Estratos en los primeros metros de los pozos Las Hilamas y Cd. 17. 80
Figura 6.10 Sobreposición de la zona de interés con la geología superficial. 81
Figura 6.11 Zona de aportación. Fuente: Elaboración propia con información de SAPAL y Google Earth. 82
Figura 6.12 Esquema del pozo de observación al interior de la obra de infiltración. 86
Figura A.1 Valores de los parámetros a, b y c, en función del cociente de lluvia-duración, R. 99
Figura A.2 Escala de tiempo geológico. 116
Figura A.3 Clasificación de los principales grupos de rocas ígneas. 119
Figura A.4 Clasificación de las rocas sedimentarias detríticas. 120
Figura A.5 Clasificación de las rocas sedimentarias químicas. 121
Figura A.6 Clasificación de las rocas metamórficas comunes. 122
Figura A.7 Esquema de operación del permeámetro de Guelph 123
Figura A.8 Factor de forma C 126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Capacidad de remoción de contaminantes de las trincheras 10
Tabla 4.1 Capacidad de Infiltración para diversos tipos de suelo. 26
Tabla 4.2 Ejemplos de usos de suelo potencialmente contaminantes 31
Tabla 4.3 Periodos de Retorno para Diseño de Sistemas de Alcantarillado Pluvial. 40
Tabla 4.4 Periodos de Retorno para Diseño de Sistemas de Alcantarillado Pluvial. 41
Tabla 5.1 Precipitación media anual y temperatura media anual en el municipio de Guanajuato..... 58
Tabla 5.2 Subcuencas hidrológicas en el municipio de León, Gto. 59
Tabla 6.1 Resultados de la prueba de infiltración 74
Tabla 6.2 Resultados de la primera prueba de infiltración 74
Tabla 6.3 Resultados de la primera prueba de infiltración 75
Tabla 6.4 Resultados de la primera prueba de infiltración 75
Tabla A.1 Valores de μ_y y σ_y en función del tamaño muestral.....102
Tabla A.2 Eventos ordenados y probabilidad de ocurrencia 104
Tabla A. 3 Ajuste a la distribución de probabilidad normal. 106
Tabla A. 4 Ajuste a la distribución de probabilidad Lognormal. 108
Tabla A.5 Ajuste a la distribución de probabilidad Gumbel. 110
Tabla A.6 Ajuste a la distribución de probabilidad Pearson.....112
Tabla A.7 Categorías de estructura y textura de suelos para la estimación del parámetro α 126

1. Justificación

Si no puedo dibujarlo, es que no lo entiendo.

Albert Einstein

La afectación de zonas boscosas y de recarga, debido al desarrollo de zonas urbanas y consiguiente impermeabilización han modificado los ciclos hidrológicos locales, aumentando la cantidad de agua que escurre durante la época de lluvia, teniendo como consecuencia que un gran número de ciudades sufran inundaciones y encharcamientos recurrentes. Los sistemas de alcantarillado, la mayoría de las veces, no tienen la capacidad suficiente para su desalojo; por ello y tomando en cuenta que el agua de lluvia como principal fuente de recarga y de calidad debe considerarse como un recurso aprovechable.

Esta propuesta está enfocada al aprovechamiento de agua de lluvia, para su uso y manejo en zonas urbanas, además de contribuir al mecanismo natural de recarga mediante la implementación de una obra civil, en fase piloto, que permita preservar su calidad para inducir su infiltración e incorporación a los acuíferos regionales y/o locales.

Además es importante tomar en cuenta que cualquier propuesta enfocada a la solución de una problemática puntual debe ser parte de una solución integral que considere las diferentes causas que la han provocado.

Actualmente el municipio de León, a nivel nacional, es de los más comprometidos con la preservación del recurso de agua, por tanto se han dado a la tarea de buscar métodos que ayuden a crear un esquema sustentable de aprovechamiento y manejo de agua.

Siendo tema de importancia no sólo para los especialistas e involucrados directamente en el tema, sino también en otros niveles de gobierno se ha mostrado interés en fomentar acciones que sienten las bases para llegar al esquema deseado de sustentabilidad.

Como parte de las propuestas que el actual gobierno municipal tiene para mejorar la calidad de vida de la población, está el llevar a cabo lo que se ha denominado Siembra de Agua, es decir recarga del sistema acuífero para aumentar la disponibilidad del recurso en calidad y cantidad.

El gobierno municipal, a través del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León, SAPAL, ha firmado un convenio de colaboración con la Universidad Nacional Autónoma de México, a través del Centro de Geociencias y el Instituto de Geofísica, para desarrollar el proyecto Siembra de Agua, el cual tiene dos componentes, la infiltración de agua en la zona no urbana del municipio y la infiltración en la parte urbanizada.

La presente tesis muestra el análisis a la fecha de la problemática de encharcamientos en la zona urbana y una propuesta para implementar una obra piloto de infiltración en una zona de afectación.

Inicia programa de siembra de agua en el Municipio de León

- Arranca proyecto con la firma del cuerdo de intención entre Sapal y la UNAM para la realización de estudios
- La finalidad es favorecer la recarga de los acuíferos para combatir la sobre explotación.

Este lunes, el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León, y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), firmaron el acuerdo de intención para llevar a cabo el proyecto "siembra de agua" en León, evento en el que fungió como testigo de honor el alcalde Ricardo Sheffield Padilla.

Con esto se dio inicio a la acción número 91 del programa "100 acciones x 100 días", propuesta por el Alcalde al comienzo de su gestión, para buscar las mejores soluciones al problema de sobre-explotación de los mantos acuíferos de la región.

Este proyecto tiene como finalidad favorecer la recarga de los acuíferos del Municipio y sus alrededores, como una medida más para asegurar el abasto del líquido vital hacia la población leonesa.

Sapal llevará a cabo este proyecto, pero primero, es necesario hacer los estudios pertinentes para la adecuada ejecución de la siembra de agua, pues si no se conoce el estatus de los acuíferos y zonas más propicias para la siembra, se corre el riesgo de contaminar los acuíferos.

"La siembra de agua es un proyecto muy ambicioso, que debe ser llevado a cabo de acuerdo con cuidadosos estudios técnicos y científicos, para auxiliar a la Naturaleza en el proceso de infiltrar agua hacia el subsuelo con seguridad. Esta iniciativa del Alcalde Ricardo Sheffield la toma el Sapal con seriedad y con entusiasmo, y por ello hemos invitado a la Dra. Alejandra Cortés Silva, investigadora de del Instituto de Geofísica de la UNAM, quien ya ha tenido relación con el Organismo, para que realice los estudios necesarios para llevar esta iniciativa hacia su realización", resaltó el Presidente del Consejo de Sapal, Ing. Jorge Videgaray Verdad.

Queremos ser ejemplo a nivel internacional: Sheffield Padilla

El alcalde Ricardo Sheffield Padilla señaló: "Yo quisiera que así como Sapal es líder a nivel nacional en muchos temas, así como es un organismo líder a nivel nacional, en América Latina y en el mundo, yo quisiera que hiciera que voltearan los ojos de la comunidad internacional hacia León, en los programas de siembra de agua...

"Es a lo que aspiro y yo sé que lo podemos lograr porque empezamos con el pie derecho, haciendo los estudios necesarios para que en un futuro muy corto empecemos con la siembra de agua".

Fuente: http://www.sapal.gob.mx/comunicadosprensa/

344-start-planting-program-of-water-in-the-municipality-of-leon

2. Objetivo

El experimentador que no sabe lo que está buscando no comprenderá lo que encuentra.

Claude Bernard

En el presente trabajo se tiene como objetivo el desarrollo de los siguientes puntos:

- Localización de un sitio para albergar una obra de infiltración de agua de lluvia, en la zona urbana del municipio de León, Gto., considerando:
    - Normatividad vigente
    - Profundidad del nivel freático
    - Distancia a fuentes de contaminación
    - Distancia a pozos de abastecimiento
    - Tipo de acuífero
    - Características hidráulicas del medio
    - Área disponible
    - Puntos de encharcamiento
- Propuesta de una obra de infiltración de agua de lluvia, para la zona urbana del municipio de León, Gto., con base en:
    - Características hidráulicas del medio (capacidad de infiltración)
    - Hidrometeorología local
    - Normatividad vigente

3. Antecedentes

Se cometen muchos menos errores usando datos incorrectos que no empleando dato alguno.

Charles Babbage

El problema de escasez de agua a escala mundial ha originado la investigación y desarrollo en técnicas e instrumentación enfocadas principalmente a su reuso. En muchos casos estas técnicas han sido desarrolladas en países en los cuales la necesidad del recurso no es apremiante, como en Canadá y algunas zonas de los Estados Unidos, pero se ha tomado en cuenta su preservación. En las últimas décadas se han ejecutado medidas enfocadas a fomentar el reuso del agua y en consecuencia la preservación de los recursos naturales.

A continuación se describen las principales características de la recarga artificial e inducida.

3.1. Recarga artificial

El conjunto de técnicas que se han desarrollado para la reubicación del agua superficial que permiten inducir una recarga artificial, tienen el objetivo de eficientar la explotación de los acuíferos por un aumento del recurso y creación de reservas de agua subterránea, mediante una intervención directa o indirecta en el ciclo del agua[1].

Los métodos utilizados para llevar a cabo la recarga dependen de factores como: el terreno, subsuelo, tipo de agua, necesidades y condiciones socioeconómicas de la zona. Dentro de los principales objetivos de la recarga artificial están[2]:

- Mantener el recurso y regularizarlo.
- Restaurar un acuífero excesivamente explotado.
- Almacenar agua.
- Mejorar la calidad del agua que se recarga por residencia en el acuífero
- Combatir la intrusión marina y la contaminación, creando barreras hidráulicas apropiadas.
- Utilizar el acuífero como conducto de distribución.
- Disposición del agua residual.
- Diluir el agua del acuífero y contribuir a mantener un apropiado balance de sales, principalmente en zonas agrícolas.
- Reducir la subsidencia por exceso de bombeo.
- Mezclar agua de diferente calidad.
- Desalojar el exceso de agua pluvial de zonas urbanas (objetivo de éste trabajo).

[1] Custodio. P. 1967.
[2] ídem

3.1.1. Métodos de recarga

Antes de puntualizar sobre los métodos de recarga es necesario distinguir entre recarga inducida y recarga artificial. La primera consiste en crear situaciones favorables a la infiltración natural; los métodos utilizados consisten en preparar superficies de forma adecuada, como terrazas y trincheras; la extracción controlada en puntos favorables para lograr una mayor infiltración de agua al acuífero. Este tipo de recarga está limitada por la colmatación del subsuelo.

La recarga artificial consiste en el desarrollo de obras civiles, especialmente diseñadas para infiltrar el exceso de agua en puntos con características definidas; los métodos utilizados se distinguen en los siguientes sistemas:

- Recarga en superficie
- Recarga en profundidad
- Mixtos, compuestos por elementos de los dos sistemas

3.1.1.1. Recarga Superficial

La implementación de los métodos a continuación descritos depende en gran medida de las condiciones del medio circundante como son: tipo de suelo, espacio disponible, regímenes de escurrimiento, registros hidrometeorológicos, etc. Posteriormente se describirán cuáles son algunos de los estudios para conocer las condiciones bajo las cuales estará sujeto el proyecto.

- La recarga superficial consiste en crear una superficie de contacto, agua-terreno, para inducir más fácilmente el proceso de infiltración. Este método es de mayor factibilidad en el caso de acuíferos libres. Los factores más importantes a considerar son:
- Capacidad de infiltración del terreno, cuanto menor es la capacidad de infiltración, mayor será el área requerida.
- Calidad del agua de recarga.
- Temperatura del agua. A mayor temperatura menor viscosidad y se favorece la infiltración.
- Topografía del terreno
- Geometría de la obra de recarga.

Con base a lo mencionado anteriormente, se han desarrollado diversos tipos de obras cuyo objetivo es infiltrar el agua artificialmente. A continuación se describen algunos sistemas de infiltración, así como sus rasgos y características que deben ser considerados y adaptados a las condiciones de las zonas piloto en México.

3.1.1.2. Recarga Superficial

3.1.1.2.1. Fosas

En acuíferos profundos de espesor considerable, formados por materiales no consolidados, es posible excavar grandes fosas, o bien utilizar aquellas que son el resultado de la extracción de materiales para la construcción, bancos de material, hacia las cuales se conduce el agua que se empleará para la recarga. La profundidad varía de acuerdo a las condiciones del terreno. Una ventaja de estas obras consiste en la posibilidad de almacenar grandes volúmenes de agua, producto de eventos extraordinarios de precipitación e infiltrarla, ver Figura 3.1.

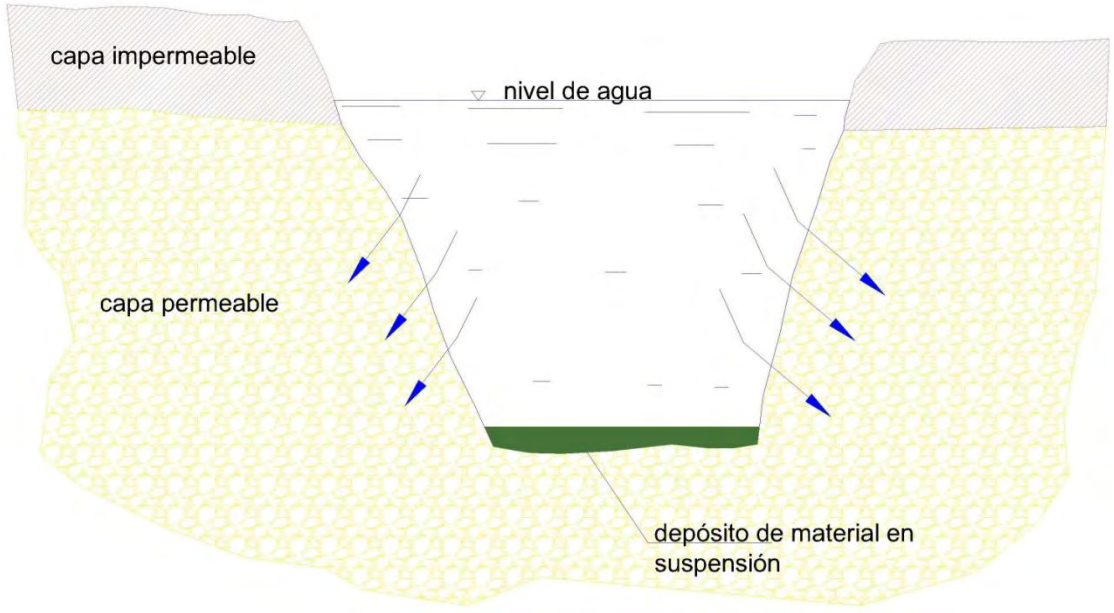
Las paredes deben tener un talud que mantenga la estabilidad de la obra. Es recomendable colocar filtros de grava y arena en el fondo (0.2 - 2 m de espesor) que se limpia o renueva periódicamente para disminuir la colmatación en la capa subyacente.

3.1.1.2.2. Trinchera de infiltración

Las trincheras de infiltración son excavaciones rellenas con agregados de diferentes características que sirven para crear un depósito artificial subterráneo[3]. El volumen de agua que llega a la trinchera se almacena temporalmente y se infiltra, contribuyendo a preservar el balance natural fomentando la recarga hacia los acuíferos.

[3] Stormwater Technology Fact Sheet: Inltration Trench. USEPA. Office of Water Washington, D.C.EPA 832-F-99-019 September - 1999

Figura 3.1 Fosa de recarga



Fuente: Elaboración propia

La experiencia indica que las trincheras no sólo favorecen la infiltración, también poseen la capacidad de remover y/o adsorber sustancias contaminantes en proporciones similares a las que tienen los sistemas de infiltración rápida, usados para el tratamiento de aguas residuales. Lo anterior dependerá del diseño y tipo de materiales utilizados en su construcción. En la Tabla 3.1 se muestra la eficiencia de remoción de algunos contaminantes[4], la cual puede ser mejorada usando agregados limpios, adicionando materia orgánica, limos (loam) a la trinchera o instalando un geotextil.

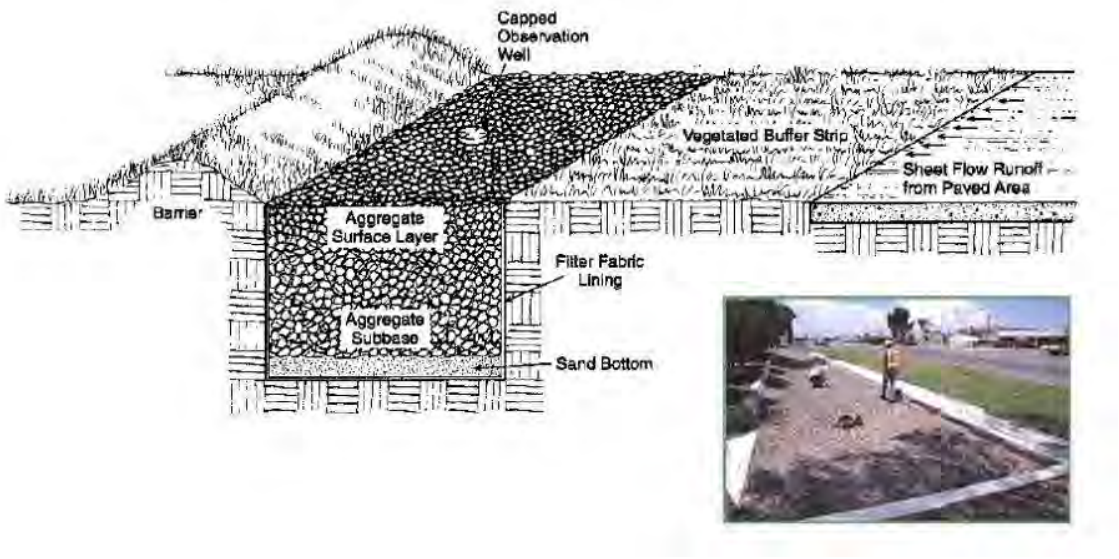
Tabla 3.1 Capacidad de remoción de contaminantes de las trincheras

Parámetro	Capacidad de remoción
Sólidos suspendidos totales	80%
Fósforo total	60%
Nitrógeno total	60&
Coliformes fecales	90%
Metales pesados	90%

Fuente: USEPA

[4] Fuente: Georgia Stormwater Management Manual, p. 3.2-77.

Figura 3.2 Trinchera de infiltración



Fuente: Georgia Stormwater Management Manual

En la bibliografía consultada se recomienda el uso de trincheras en zonas comerciales, residenciales y de oficinas con densidad de ocupación media a alta. No es recomendable situar este tipo de dispositivos en zonas industriales o cercanas a estas por el riesgo potencial de contaminación para el agua subterránea. El sitio donde se ubique este tipo de obra deberá tener una buena capacidad de infiltración.

En zonas urbanas, de manera recurrente, no se tienen las condiciones necesarias (capacidad de infiltración, área disponible, condiciones sanitarias, etc.) para desarrollar estos dispositivos. Por ésta razón se deben buscar sitios donde sea posible su instalación y llevar a cabo las obras necesarias para conducir el agua hasta ellos. Para este fin se propone el uso de parques, camellones, glorietas, etc.

3.1.1.2.3. Áreas de Biorretención

Las áreas de biorretención son un tipo de dispositivo desarrollado a principios de los años 90 por el Departamento de Recursos Naturales del Condado Prince George, Maryland (PGDER por sus siglas en inglés). Su principio se basa en la utilización de sistemas biológicos para la transformación de nutrientes y sustancias contaminantes, por lo que ha sido usado en agricultura y en sistemas de tratamiento de agua residual. Éstas obras, de dimensiones considerables, se realizan en zonas bajas/deprimidas del terreno. Su diseño debe adaptarse a la superficie disponible, tipo de suelo y vegetación endémica.

Éste sistema emplea un modelo que trata de recrear un medio natural con vegetación, permitiendo la infiltración, filtración, almacenamiento y el mejoramiento de la calidad del agua mediante procesos físicos, biológicos y químicos.

Figura 3.3 Esquema conceptual de un área de biorretención

Fuente: Portland Stormwater Management Manual

3.1.1.3. Recarga profunda

Los sistemas de recarga a profundidad se aplican especialmente en zonas densamente pobladas, donde las características geológicas determinarán el tipo de obra. En ambientes donde predominan calizas y areniscas se emplea la recarga mediante pozos verticales. Mientras que en aluviones, arenas de

dunas y de playa, así como en terrenos volcánicos es posible aplicar cualquiera de los dos métodos[5], superficial o profundo. Éste sistema se hace necesario cuando se tienen acuíferos donde se alternan capas permeables e impermeables, donde además de utilizar pozos verticales, es posible emplear pozos de drenes radiales y en menor medida galerías de infiltración[6]. Las características principales de estos sistemas son:

- Mayor costo de construcción y mantenimiento
- Necesidad de utilizar agua de mejor calidad para aminorar los problemas de colmatación, dado que la superficie de infiltración es menor y evitar la contaminación del agua subterránea.

La mayor ventaja de este sistema radica en el área necesaria para llevarse a cabo, lo cual es de suma importancia en zonas donde no hay disponibilidad de terreno.

3.2. Marco normativo

3.2.1. NOM-015-CONAGUA-2007

En México la política y gestión de los recursos hídricos se rigen por la Ley de Aguas Nacionales, que es el órgano que se encarga de regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo integral sustentable.

En la misma Ley se establecen las funciones de la Comisión Nacional del Agua, como autoridad en materia de la cantidad y la calidad de las aguas y su gestión en el territorio nacional y ejercer las atribuciones que le corresponden[7]. Dentro de las atribuciones de la comisión está el proponer Normas Oficiales Mexicanas.

La Comisión Nacional del Agua, en el año 2003 desarrolló un proyecto de Norma Oficial Mexicana para regir la infiltración artificial a los acuíferos, NOM-015-CONAGUA-2007. Los objetivos de esta Norma Oficial son

- Proteger la calidad del agua de los acuíferos.
- Aprovechar el agua pluvial y de escurrimientos para aumentar la disponibilidad de agua subterránea a través de la infiltración superficial.

[5] Bourguet, 1971. Referido en Custodio.
[6] Custodio, p. 1979.
[7] Artículo 9. Capítulo III. Ley de Aguas Nacionales.

Cabe destacar que la aplicabilidad de esta Norma se ciñe a las obras que tengan capacidad de infiltración *mayor a 60 lps*; sin embargo aunque las obras no estén diseñadas para incorporar dicho volumen al acuífero, se deberá tomar ésta Norma como una guía para evitar contaminación del agua subterránea y garantizar el correcto funcionamiento de las obras de infiltración. De esta Norma se extraen los siguientes puntos.

5.1 En el caso de obras y actividades para la infiltración de aguas pluviales o de escurrimiento superficial al suelo se atenderá lo siguiente:

5.1.1 Las obras y actividades a que se refiere ésta Norma, deberán en todo momento respetar lo dispuesto por las declaratorias de áreas naturales protegidas y sus programas de manejo.

5.1.2 El suelo deberá estar caracterizado conforme a lo dispuesto por la Norma ISO 15175:2004 Calidad del suelo. Caracterización del suelo en relación con la prospección del agua subterránea; la que la substituya, o la NMX correspondiente.

5.1.3 En áreas propensas a deslaves o con pendientes abruptas e inestables, sólo podrán llevarse a cabo las obras y actividades a que se refiere la presente, cuando se hayan realizado obras de ingeniería para estabilizar el terreno.

5.1.4 En terrenos que hubieran sufrido algún evento de contaminación, quién realice la obra deberá asegurarse que no está inscrito como predio contaminado.

5.1.4.1 Se considerará que existió un evento contaminante y que éste ha sido remediado de conformidad con lo establecido en la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos y su Reglamento así como las normas oficiales mexicanas correspondientes.

5.1.4.2 La disposición de aguas al suelo y a la zona no saturada, no debe afectar captaciones de agua subterránea o a obras civiles de terceros.

5.1.4.3 No se podrá realizar la disposición al suelo o subsuelo de aguas residuales crudas, o la mezcla de éstas con aguas

pluviales o de escurrimiento superficial, salvo cuando se cumpla la NOM-014-CONAGUA-2007.

5.1.4.4 Se podrá llevar a cabo la disposición de aguas a que se refiere la presente, previendo que se tenga una limpieza de basura de la zona.

5.2 En el caso de la disposición de aguas pluviales o de escurrimiento superficial a la zona saturada, se aplicarán las siguientes:

5.2.1 Se deberán observar las especificaciones establecidas en el numeral 6.2 de la Norma Oficial Mexicana NOM-003-CONAGUA-1996, Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua, para prevenir la contaminación de acuíferos.

5.2.2 La infiltración no deberá afectar la calidad del agua nativa. Para el muestreo del agua nativa se utilizará la Norma ISO/CD 5667-11-2006 Calidad del agua.

Parte 11. Guía para el muestreo de aguas subterráneas, la que la sustituya o la NMX correspondiente.

5.2.3 Las obras de disposición de aguas al subsuelo mediante pozos de infiltración, deben contar con un sistema de tratamiento que garantice que el agua en el punto de infiltración, tendrá los límites establecidos en la tabla siguiente.

Contaminante	**Unidad de medida**	**Límite**	**Método de prueba**[8]
Grasas y aceites	mg/l	15	NMX-AA-005-SCFI-2000
Materia flotante	mg/l	0	NMX-AA-006-SCFI-2000
Sólidos sedimentables	mg/l	2	NMA-004-SCFI-2000
Sólidos suspendidos totales	mg/l	150	NMX-AA-034-SCFI-2001
Nitrógeno total	mg/l	40	NMX-026-SCFI-2001
Fósforo	mg/l	20	NMX-029-SCFI-2001
Coliformes fecales	NMP/100 ml	No detectable	NMX-AA-042-1987

[8] En términos del artículo 49 de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización se podrán utilizar otros métodos de prueba o los señalados en las normas mexicanas enunciadas.

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

5.2.4.1 Un laboratorio acreditado deberá emitir los informes correspondientes.

5.2.4.2 Se deberá incorporar en el pozo un instrumento de muestreo y prueba con la norma ISO 15839:2003 Water quality On-line sensors/analising equipment for water Specifications and performance tests, la que sustituya o la NMX correspondiente.

5.2.4.3 Los resultados de pruebas realizadas con el instrumento señalado en el numeral anterior podrán ser requeridas por la autoridad en las visitas de inspección.

5.2.5 La distancia mínima entre el fondo y la superficie freática será de cinco metros.

En la misma NOM se establecen las actividades que se deben llevar a cabo para monitorear el funcionamiento del sistema, las acciones necesarias para su mantenimiento o abandono.

3.2.2. Normatividad Asociada

A continuación se resumen los puntos más relevantes, relacionados al diseño de sistemas de infiltración y su aplicabilidad, contenidos en Normas y Leyes referidas en la NOM-015-CONAGUA-2007.

3.2.2.1. NOM-003-CONAGUA-1996

Cómo anteriormente se mencionó, la ubicación de los dispositivos de infiltración debe cumplir con los mismos que una obra para extracción de agua subterránea. En el apartado 6.2 de la NOM-03-CONAGUA-1993, se establecen las áreas restringidas para el emplazamiento de pozos. A continuación se cita lo contenido en dicho apartado.

El área de protección entre el sitio seleccionado para construir un pozo y las fuentes potenciales de contaminación existentes que no pueden ser suprimidas, tendrá un radio mínimo de 30 m con respecto al pozo. Las fuentes de contaminación son las siguientes (esta lista no es limitativa, sino que depende de lo que, para situaciones y condiciones particulares, la Comisión considere necesarias):

- Alcantarillado sanitario
- Campos de percolación
- Canales de aguas residuales
- Cloacas
- Depósitos de jales
- Fosas sépticas
- Gasolineras y depósitos de hidrocarburos
- Lechos de absorción
- Letrinas
- Pozos abandonados no sellados
- Pozos de absorción
- Puntos de descarga de aguas residuales de uso industrial
- Rellenos sanitarios
- Ríos y cauces con aguas residuales provenientes de los usos definidos en los puntos 4.31 a 4.39
- Rastros y establos

El radio mínimo podrá ser modificado por la Comisión o por la autoridad local competente, a través de la disposición legal o reglamentaria aplicable, con base en un estudio específico del sitio que considere la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación y la extensión de su área de influencia, para diferentes tiempos.

Cuando no sea posible cumplir el radio mínimo especificado en la presente Norma o en la disposición local reglamentaria, el concesionario o asignatario deberá presentar a la Comisión el diseño que propone, para evitar la contaminación del acuífero, basado en estudios hidrogeológicos.

3.3. Experiencia Previa

En México se cuenta con alguna experiencia en el manejo de agua de lluvia mediante obras para infiltración, asociada más a las necesidades propias y urgentes de un sitio que sufre de encharcamientos recurrentes, que a una planeación integral donde las obras de infiltración sean un método recurrente de apoyo a los sistemas de desalojo de agua pluvial.

3.3.1. Infiltración de agua pluvial: Jardínes del Pedregal

La colonia Jardínes del Pedregal, emplazada sobre derrames basálticos, es una de las zonas geotécnicas más favorables para el desarrollo de edificaciones en la Ciudad de México, debido a que el tipo de suelo reduce los

costos en cimentaciones. Sin embargo, éste medio hace costosa la construcción de un sistema de drenaje pluvial.

En esta zona, es común encontrar partes de las vías de tránsito que presentan depresiones las cuales en temporada de lluvias propician la formación de grandes encharcamientos que impiden la circulación de los vehículos por varias horas. En ocasiones estos encharcamientos provocan pérdidas materiales, ya que los automóviles quedan varados y en el peor de los casos quedan sumergidos. Es por ello que se volvió una necesidad en esta zona el encontrar una solución práctica y rápida a esta problemática.

Las rocas basálticas presentan un grado de fracturamiento tal, que propicia una buena capacidad de infiltración, que permite el desalojo de grandes volúmenes de agua en tiempos relativamente cortos. La solución fue relativamente sencilla, en las depresiones de los arroyos viales donde eran frecuentes los encharcamientos, se excavaron fosas que sirven como dispositivos de infiltración, las únicas protecciones que tienen son rejillas, que impiden el paso de material sólido: hojas, ramas, botellas, etc. Como resultado de la construcción de estos dispositivos, disminuyó la frecuencia y magnitud de los encharcamientos. Por otra parte la obra no afecta la armonía estética del medio.

3.3.2. Infiltración de agua residual tratada: Caso Lesser

El proyecto que se presenta a continuación no se apega totalmente al tema que aborda ésta tesis, infiltración de agua de lluvia, sin embargo sienta un precedente en cuanto a infiltración artificial en México, y es por ello que se escogió un proyecto, que puede aportar información importante para cualquier proyecto con objetivos similares.

Durante la década de los años noventa, la Ciudad de México requería de grandes volúmenes de agua, obtenidos por medio de la importación de agua de otras cuencas o con pozos profundos. La extracción excesiva propició que se sobrepasara la recarga natural del sistema acuífero, causando abatimientos de los niveles de agua, que en dicha década alcanzaban 3 metros por año en algunas zonas, originando también problemas como la compactación del subsuelo y hundimientos del terreno que a su vez, provocan problemas en los sistemas de drenaje de la ciudad.

Para lograr atenuar los efectos de la extracción intensiva de agua y utilizar el acuífero como una zona de almacenamiento de agua para uso futuro, se propuso hacer la recarga de manera artificial.

Las primeras acciones de este proyecto estuvieron encaminadas a definir cuáles son las zonas más propicias, debido a sus características geológicas, para implementar un sistema de recarga artificial. A continuación se describe brevemente cuáles fueron las zonas más favorables para los fines de dicho proyecto.

- Sierra Chichinautzin y Sierra de Santa Catarina, donde las rocas predominantes son basaltos, que presentan una alta permeabilidad debido a su fracturamiento, y material piroclástico, que por su alta permeabilidad permiten la infiltración mediante pozos y sistemas en superficie, con tasas de recarga de hasta 80 lps y 700 lps respectivamente.
- Sierra de las Cruces, donde la Formación Tarango que aflora al pie de dicha sierra, presenta material granular que le otorga una permeabilidad considerada como media, donde es posible infiltrar alrededor de 20 lps por pozo.
- Dentro de la Ciudad de México, existen zonas con materiales granulares que permiten una tasa de infiltración de 10-30 lps por pozo y hacia el Valle de Texcoco se presentan permeabilidades de medias a bajas, donde se podrían recargar de 5-10 lps por pozo.

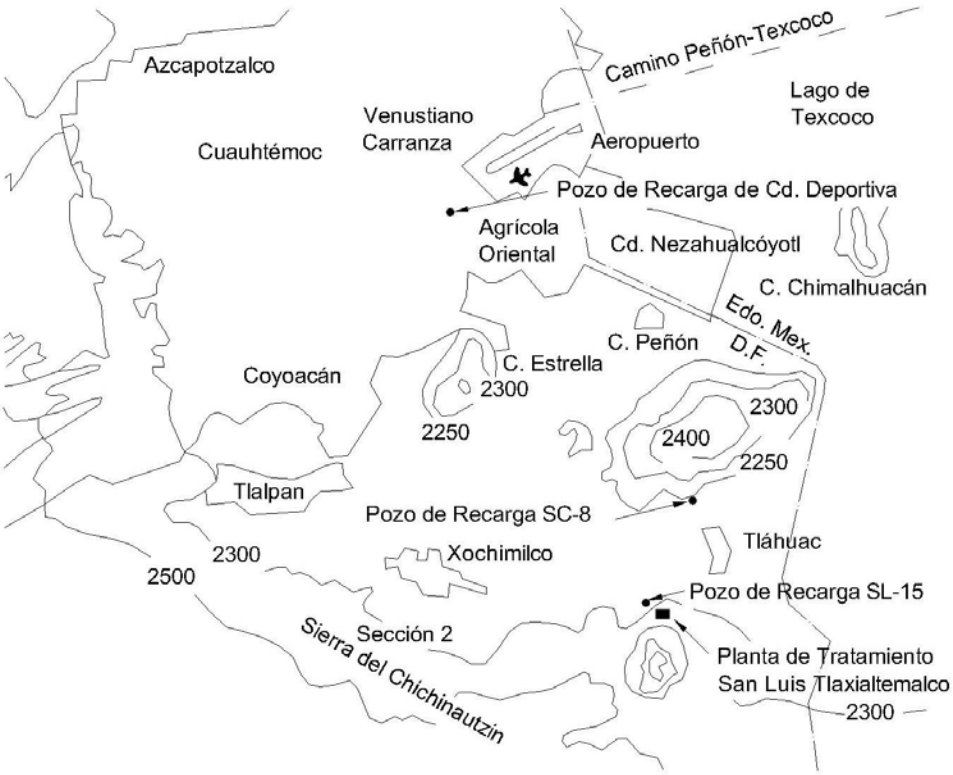
En ese entonces, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México utilizaba alrededor de 61.5 m^3/s, de los cuales sólo un mínimo porcentaje de ésta se trataba y era usada para riego de áreas verdes, industrias y llenado de canales y cuerpos de agua como el sistema de canales de Xochimilco, de manera que existía un remanente de agua residual.

De las 23 plantas de tratamiento de agua residual, se eligieron 7 plantas donde sería necesario construir un pozo de recarga por cada una de ellas, en algunos casos no fue necesaria la perforación de un pozo, ya que se encontraban cerca de pozos de extracción fuera de servicio.

En cuanto a la calidad del agua tratada para la recarga, las plantas deberían mejorar la eficiencia de tratamiento mediante procesos adicionales.

Por otro lado, la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) construyó una laguna para la infiltración de aguas tratadas sobre el flanco sur de la Sierra de Santa Catarina, donde se obtuvieron gastos de recarga alrededor de 700 lps a través de una superficie de 6 hectáreas.

Figura 3.4 Ubicación de pozos de recarga de agua tratada.



Fuente: Modificado de Lesser, 1991

4. Metodología propuesta

Si he conseguido ver más lejos, es porque me he aupado en hombros de gigantes.

Isaac Newton

Actualmente en las normas referentes al uso y aprovechamiento del agua, se hace énfasis en el uso del agua de lluvia con fines de recarga. Sin embargo, no se cuenta con una metodología o guía para el diseño de obras civiles destinadas a la infiltración de agua de lluvia.

Con base en la bibliografía consultada, se proponen los siguientes pasos como parte de la selección y diseño de obras que permitan infiltrar el agua de lluvia con fines de recarga, o sólo como parte de un sistema de manejo de agua de lluvia, que permita evitar encharcamientos e inundaciones frecuentes en zonas urbanas y/o rurales.

4.1. Metodología

La implementación de dispositivos de infiltración en cualquier tipo de entorno, depende fundamentalmente de dos parámetros, la capacidad de infiltración del suelo y la topografía. Estos parámetros definen las trayectorias de escurrimiento del agua pluvial, siendo los elementos fundamentales para ubicar los sitios más aptos para construcción de sistemas que permitan captar e infiltrar el agua pluvial. Debido a que éste trabajo está enfocado a la infiltración en sitio en una zona urbana, si se consideran estos parámetros en algunos casos, no será necesario construir un sistema de captación y conducción, como un alcantarillado pluvial y/o conducción superficial, como sucede cotidianamente para zonas urbanas.

En este tipo de proyectos se utilizarán las condiciones naturales del sitio para favorecer la construcción de dispositivos de infiltración, que requerirán la menor cantidad de infraestructura asociada, reduciendo los costos de inversión, operación y mantenimiento.

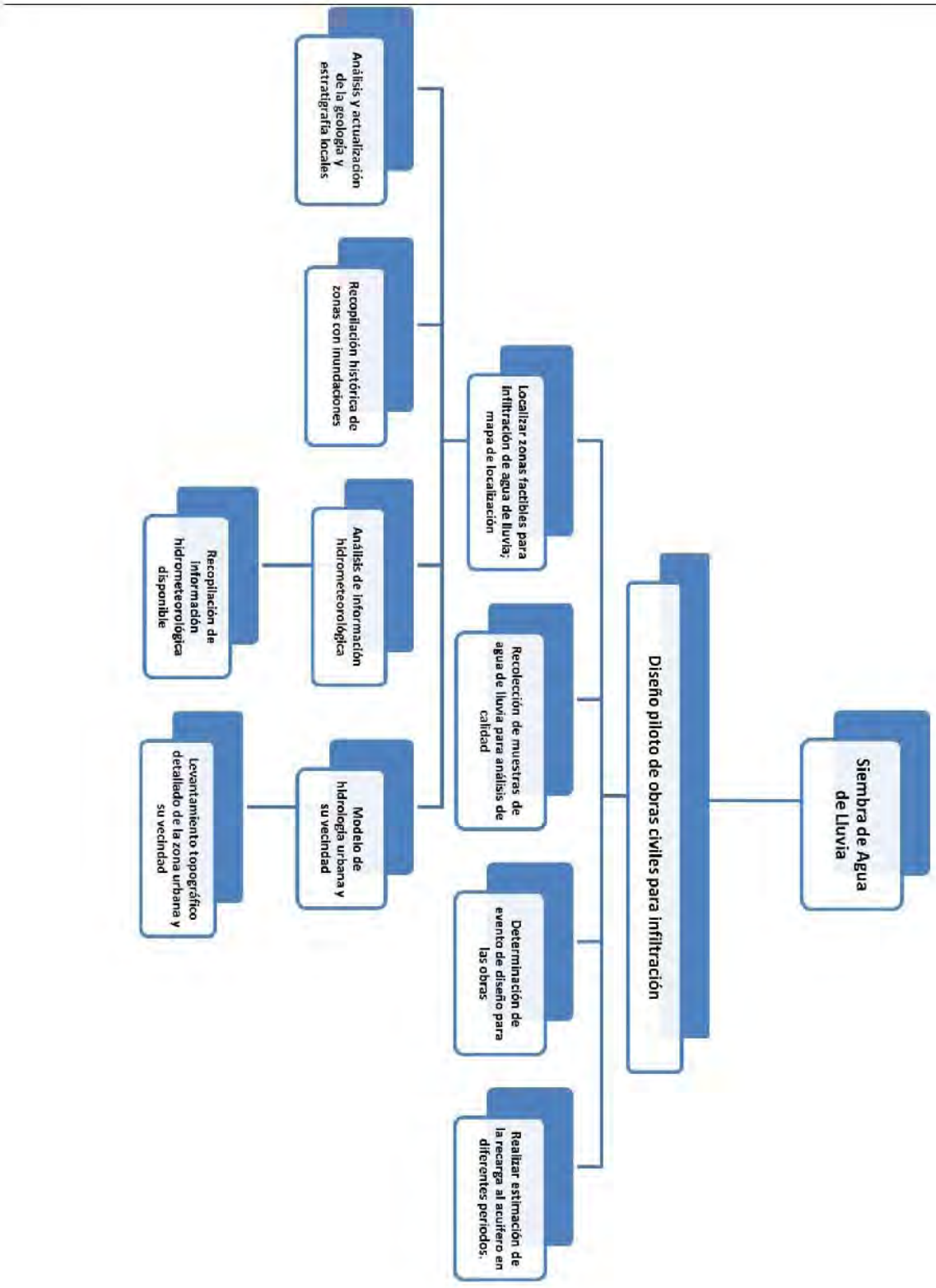
El método descrito a continuación deberá ser evaluado en cada caso para definir los estudios necesarios a detalle, con base en el conocimiento del medio físico. En la Figura 4.1 se muestra la relación y jerarquía de actividades para este tipo de proyectos y a continuación una descripción de estas.

- Realizar un levantamiento topográfico a detalle de las rasantes de las vialidades. La justificación de esto se debe a que, cuando se tienen levantamientos con una resolución de 10 m, entre dos curvas pueden existir puntos con una elevación menor mayor que no están siendo considerados en el análisis. Estas mediciones a detalle son decisivas para generar las trayectorias preferenciales que seguirá el agua pluvial.

- Elaborar, como producto del análisis de los levantamientos topográficos, un modelo digital de elevación de la zona y su vecindad, para delimitar microcuencas urbanas y ubicar zonas potenciales de inundación, y como consecuencia definir zonas probables para la instalación de dispositivos para infiltración y/o conducción de agua pluvial, como parte de una primera aproximación.
- Analizar y comparar la base de datos histórica, de los puntos con inundaciones frecuentes, con los resultados del modelo digital de elevación.
- Recopilar y analizar la información hidrometeorológica para la determinación del evento de diseño.
- Actualizar y verificar a detalle la información geológica y estratigráfica de la zona de estudio.
- Recolectar y analizar muestras del agua a infiltrar para determinar su calidad, siguiendo los parámetros establecidos en la NOM-015-CONAGUA-2007, y algunos sugeridos por el equipo de trabajo.
- Seleccionar los sitios más aptos para construir un dispositivo para infiltración de agua pluvial, con base en los resultados del análisis del modelo digital de elevación y criterios como capacidad de infiltración, distancia a fuentes de contaminación, separación de fuentes de aprovechamientos subterráneos, etc. El producto de ésta actividad estará plasmado en un mapa.
- Diseñar y costear la obra civil para infiltración de agua pluvial, así como las obras auxiliares necesarias para su correcto funcionamiento.
- Implementar un sistema de monitoreo a través de piezómetros[9]. Estos instrumentos tendrán dos funciones, la verificación estratigráfica y la medición del comportamiento piezométrico.
- Realizar la estimación de la recarga inducida al acuífero a través de las obras de infiltración. Esta actividad se basa en el modelo matemático de predicción desarrollado para el acuífero en cuestión.

[9] Un piezómetro o pozo de observación es un pozo especialmente perforado para medir los niveles de agua en el acuífero y/o muestrear agua con fines de análisis.

Figura 4.1 Diagrama de flujo para la implementación de dispositivos de infiltración artificial.



Fuente: Elaboración propia

Debido a que no en todos los casos se cuenta con la información topográfica necesaria para elaborar un modelo digital de elevación, será posible utilizar información histórica disponible de los organismos operadores o agencias de protección civil locales, donde se verifique cuáles son los lugares con más propensión a inundarse.

4.2. Criterios de selección

Para llevar a cabo la selección de un sitio donde sea posible implementar un dispositivo de infiltración de agua, se deben tomar en cuenta diversos criterios de ubicación, algunos de ellos descritos en la NOM-015-CNA-2007, y otros tomados de la bibliografía consultada.

4.2.1. Capacidad de Infiltración

La capacidad de infiltración o caudal por unidad de superficie es una de las variables principales que deben tomarse en cuenta al desarrollar un proyecto de recarga. Este parámetro varía en función del gradiente hidráulico[10] en la obra de infiltración, calidad del agua, temperatura y permeabilidad natural del terreno. En función del tipo de obra para llevar a cabo la infiltración tendrá más importancia la permeabilidad[11] vertical que la horizontal y viceversa[12].

Para los sistemas de recarga en superficie cuanto menor es la capacidad de infiltración, más superficie deben ocupar las obras. Por otro lado, cuando se tienen terrenos muy permeables se corre el riesgo de colmatar[13] el suelo si no se toman las medidas necesarias durante el desarrollo de la obra, como puede ser mediante la instalación de filtros de gravas y arenas. El costo de estas obras debe considerar un presupuesto a largo plazo para su mantenimiento.

En Estados Unidos, Alemania y Holanda se han implementado sistemas de recarga en superficie y se ha observado que la permeabilidad en función del tipo de suelo varía desde unos pocos centímetros al día (0.12 m/día - La Haya) hasta el orden de metros (2.9 metros/día - Santa Ana, California)[14]. Por otro

[10] Gradiente es el incremento de una variable entre dos puntos del espacio en relación a la distancia entre esos dos puntos. En el caso del gradiente hidráulico, se hace referencia a la variación en la energía que tiene el agua o flujo en dos puntos. Estando compuesta por la energía correspondiente a su posición con respecto a un eje horizontal de referencia (energía potencial), presión del fluido y a la energía debida a la velocidad del flujo.

[11] La permeabilidad está definida como la capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna.

[12] Custodio, p. 2008.

[13] La colmatación se relaciona con la acumulación de sedimentos. En el caso de los suelos se dice que están colmatados cuando su permeabilidad se ha visto reducida debido a la acumulación de partículas entre sus poros.

[14] Custodio, p. 2010.

lado, diversos autores[15] han reportado valores de capacidad de infiltración para distintos tipos de suelo, mostrados en la Tabla 4.1. Cabe destacar que en estos sitios, los acuíferos son de tipo somero y el nivel freático se encuentra a pocos metros de la superficie del terreno.

Tabla 4.1 Capacidad de Infiltración para diversos tipos de suelo.

Capacidad de infiltración	Tipo de terreno
> 1.2 m/día	Gravas, arenas y cantos, arena fina.
0.6 a 1.2 m/día	Limos arenosos (con o sin cantos y/o gravas), limos.
< 0.6 m/día	Limos arcillosos, limos arenosos, arcillas limosas.

Fuente: ASCE, 1972

La capacidad del suelo para disponer agua residual o pluvial debe ser determinada por un estudio que defina sus características y la capacidad de infiltración o percolación. Este tipo de pruebas pueden llevarse a cabo de forma manual, mediante pequeñas excavaciones a cielo abierto (pozos de prueba), como las realizadas para extraer material destinado a pruebas geotécnicas, o bien con ayuda de equipo como son los permeámetros de aros concéntricos o permeámetros de carga constante, como el permeámetro de Guelph[16].

4.2.1.1. Prueba Manual

A continuación se describe un método manual para determinar la permeabilidad del suelo donde se planea construir un dispositivo para infiltración de agua, ya sea pluvial o residual[17].

Henry Ryon desarrolló este método a principios del siglo XX, con base en investigaciones que desarrolló en sistemas de infiltración de agua, en el estado de Nueva York. Este método ha sido utilizado en todo el mundo, y ha sufrido pocos cambios de un sitio a otro[18], permaneciendo su concepto fundamental.

Al llevar a cabo una prueba con este método se debe tener especial cuidado en saturar el suelo. Ya que la saturación es esencial para compensar la expansión del suelo, simulando así las condiciones desfavorables de operación de la obra

[15] ASCE: Ground water management: capability of extraction and recharge facilities: alternatives plans for groundwater management. Am. Soc. Civil Engineers: Manuals and Reports on Engineering Practice no. 40, 1972, Washington.
[16] Ver anexo A.4
[17] Environmental Engineering and Sanitation. Joseph A. Salvato.
[18] Ídem.

civil a diseñar y para obtener resultados reproducibles y una razón de infiltración relativamente constante para el pozo de prueba.

La confiabilidad de la prueba de infiltración se incrementa en función de una evaluación detallada de la información disponible por personal calificado (las características del suelo en general, la investigación del sitio y perfil estratigráfico). La capacitación y experiencia en geotecnia y/o geología son muy útiles para la interpretación de los resultados de la prueba.

El período de tiempo requerido para llevar a cabo la prueba de infiltración varía en función del tipo de suelo, siendo el método más confiable aquel donde se realiza la prueba en excavaciones a cielo abierto que han permanecido con agua al menos 4 horas, preferentemente la noche anterior, excepto donde se tienen suelos con arena y grava.

Los coeficientes de infiltración deben estimarse preferentemente con los datos de una prueba realizada en pozos que han permanecido con agua durante la noche anterior y se debe realizar un número de pruebas adecuado para hacer válido el resultado. Algunas dependencias gubernamentales en Estados Unidos de América solicitan que el estudio se lleve a cabo en la época de lluvias o después de esta para minimizar los errores en las pruebas.

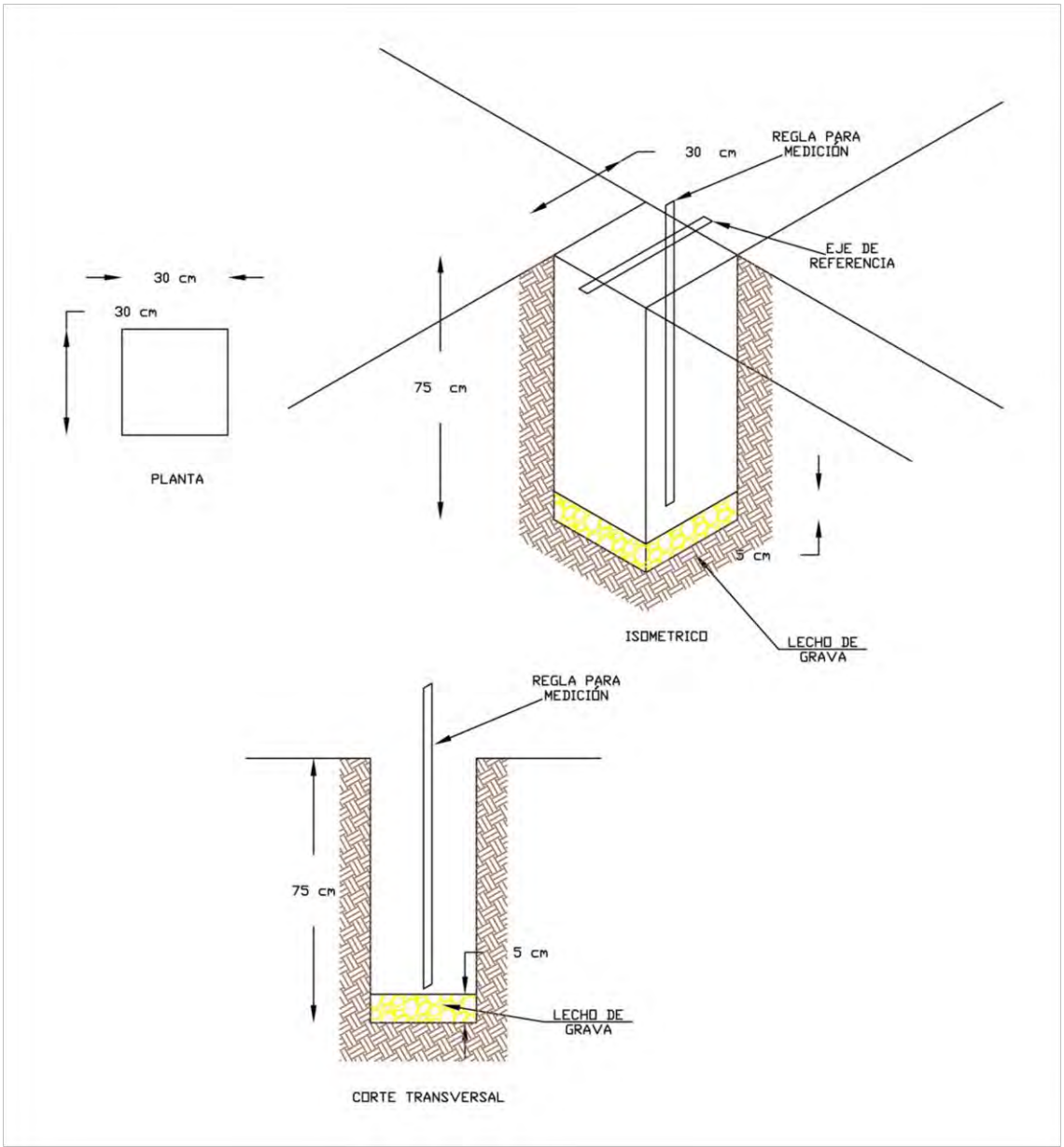
La prueba de infiltración se lleva a cabo como se describe a continuación.

1. Excavar uno o varios pozos de prueba (excavación a cielo abierto) de 30 cm por lado[19], dependiendo del área de proyecto, y de preferencia a la profundidad que tendrá el lecho del dispositivo de infiltración superficial propuesto. Limpiar el interior del pozo para eliminar todo el material cementado durante la excavación. Una profundidad promedio para el pozo son 75 cm y de preferencia deberá colocarse una cama de 5 cm de grava en el fondo del pozo.
2. Verter lentamente alrededor de 30 cm de agua sobre la grava colocada, para evitar socavación. Dejar el agua en reposo durante unas 4 horas, agregando más agua según sea necesario, y proceder como se explica en el paso 3. Si el suelo es muy absorbente, permita que el agua se infiltre. Si el suelo contiene arcilla y limo fino, se deberá saturar toda la noche. Añadir otra lámina de 25 cm de agua en el pozo y proceder como en el paso 3. El tiempo de ejecución de la prueba puede disminuirse si

[19] Área equivalente a 1 ft^2.

se tienen varios pozos de prueba llenos con agua desde la noche anterior, en el sitio elegido.

Figura 4.2 Esquema de un pozo para la prueba de infiltración.



Fuente: Modificado de Salvato, 2003.

3. Medir la velocidad de infiltración del agua. Esto se puede hacer mediante la colocación de una pieza de madera horizontal sobre la boca del pozo, Figura 4.2, (se debe tener cuidado para fijarla en una posición firme), este marco improvisado permitirá tener un valor de referencia para medir la altura de la superficie del agua, con respecto al fondo del pozo; para ello se utilizará una pieza de madera en posición vertical o

bien un flexómetro. La prueba se deberá repetir en intervalos de 1 minuto, si el nivel del agua baja rápidamente, o en intervalos de 5 a 10 minutos si el nivel de agua baja lentamente. La altura del agua deberá estar por lo menos 10 cm sobre la cama de grava. Cuando al menos tres mediciones muestren un descenso similar en el nivel del agua se considera que la prueba se ha completado, ya que para efectos prácticos se ha alcanzado una condición de equilibro.

4. Se debe repetir el paso anterior al menos tres veces, siendo preferible contar con seis ensayos. Será necesario excavar de 1 a 1.5 metros más, al menos, para garantizar que en las capas subyacentes no se encuentre el nivel freático, una capa de roca o bien capas de suelo más compactas, ya que esto será fundamental en el funcionamiento del dispositivo de infiltración.

Cuando a juicio del personal que lleva a cabo la prueba, con asesoría de un experto, no se obtengan resultados satisfactorios en las dos primeras pruebas deberá buscarse otro sitio para llevar a cabo estos trabajos.

Los resultados de la prueba de infiltración deberán expresarse como un descenso del nivel de agua en un período de tiempo dado, siendo los más comunes: mm/h y m/día.

4.2.2. Distancia Mínima a Fuentes de Abastecimiento

El agua subterránea es un recurso que en algunas zonas es la principal fuente de abastecimiento de agua para consumo humano. Por su ubicación es difícil que se contamine, sin embargo una vez que su calidad se ha visto afectada, su recuperación se vuelve costosa, inhabilitando en muchos casos el recurso para consumo humano.

En la normatividad vigente no se establece de manera directa la distancia que deben guardar estos dispositivos con respecto a los aprovechamientos de agua subterránea, pozos profundos, sin embargo refiere a la NOM-003-CNA-1996, donde se dan los criterios de ubicación de pozos de extracción. En esta norma se propone una distancia mínima de 30 metros entre pozos y fuentes potenciales de contaminación. En la bibliografía revisada sobre el tema, recomiendan separaciones que llegan a 150 metros[20].

[20] Underground Injection Wells for Stormwater. Best Management Practices Manual. Oregon Association of Clean Water Agencies.

Para verificar este punto se recomienda realizar un mapeo de los aprovechamientos subterráneos más cercanos a la zona donde se pretende implementar dispositivos de infiltración.

4.2.3. Fuentes Potenciales de Contaminación - HOTSPOTS

Un Hotspot se define como un uso de suelo con actividad que genera altas concentraciones de hidrocarburos, metales traza o tóxicos que han sido encontrados en la composición típica de los escurrimientos de agua pluvial.

El agua pluvial proveniente de este tipo de zonas no puede ser infiltrada directamente al subsuelo. En consecuencia, los dispositivos de infiltración no deberán desarrollarse en estos sitios. Una alternativa podrá ser el tratamiento del agua pluvial para remover los contaminantes presentes[21].

Como un ejemplo de estas prácticas, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos[22] en su Programa Nacional para la Eliminación de Contaminantes en las Descargas[23], señala las áreas y actividades en las cuales debe contarse con un programa para la protección y manejo del agua de lluvia. En la Tabla 4.2 se muestran los usos de suelo y actividades considerados como fuentes de contaminación[24].

4.2.1. Área Disponible

Como se mencionó anteriormente, el dispositivo que se quiera instalar y por tanto la capacidad de infiltración dominante para el tipo de infiltración asociada, son factores determinantes para estimar la superficie requerida para implementar un dispositivo de esta naturaleza.

[21] Maryland Stormwater Design Manual, 2000.
[22] Environmental Protection Agency
[23] National Pollutant Discharge System
[24] Potential Stormwater Hotspots, Pollution Prevention, Groundwater Concerns and Related Issues. Minessota Stormwater Manual.

Tabla 4.2 Ejemplos de usos de suelo potencialmente contaminantes

Zonas para el almacenamiento de vehículos viejos y de reciclaje*
Estaciones de abastecimiento de combustible
Áreas para mantenimiento de equipo y vehículos
Áreas para limpieza de vehículos y equipo*
Áreas de almacenamiento de vehículos (autobuses, camiones, etc.)*
Zonas industriales
Áreas de mantenimiento y servicio en marinas
Sitios de almacenamiento de líquidos en exteriores*
Zonas de carga/descarga de mercancía al aire libre
Instalaciones donde se generan o almacenan materiales peligrosos*
Zona de almacenamiento de contenedores
Otros usos o actividades designadas por la autoridad pertinente.

Fuente: Potential Stormwater Hotspots Pollution Prevention, Groundwater Concerns and Related Issues. Minessota Stormwater Manual.

$*$ indica que el uso de suelo o actividad requieren de un programa para la prevención de la contaminación del agua de lluvia conforme a lo establecido en el SPDES programa de la EPA[25].

4.2.2. Profundidad del nivel freático

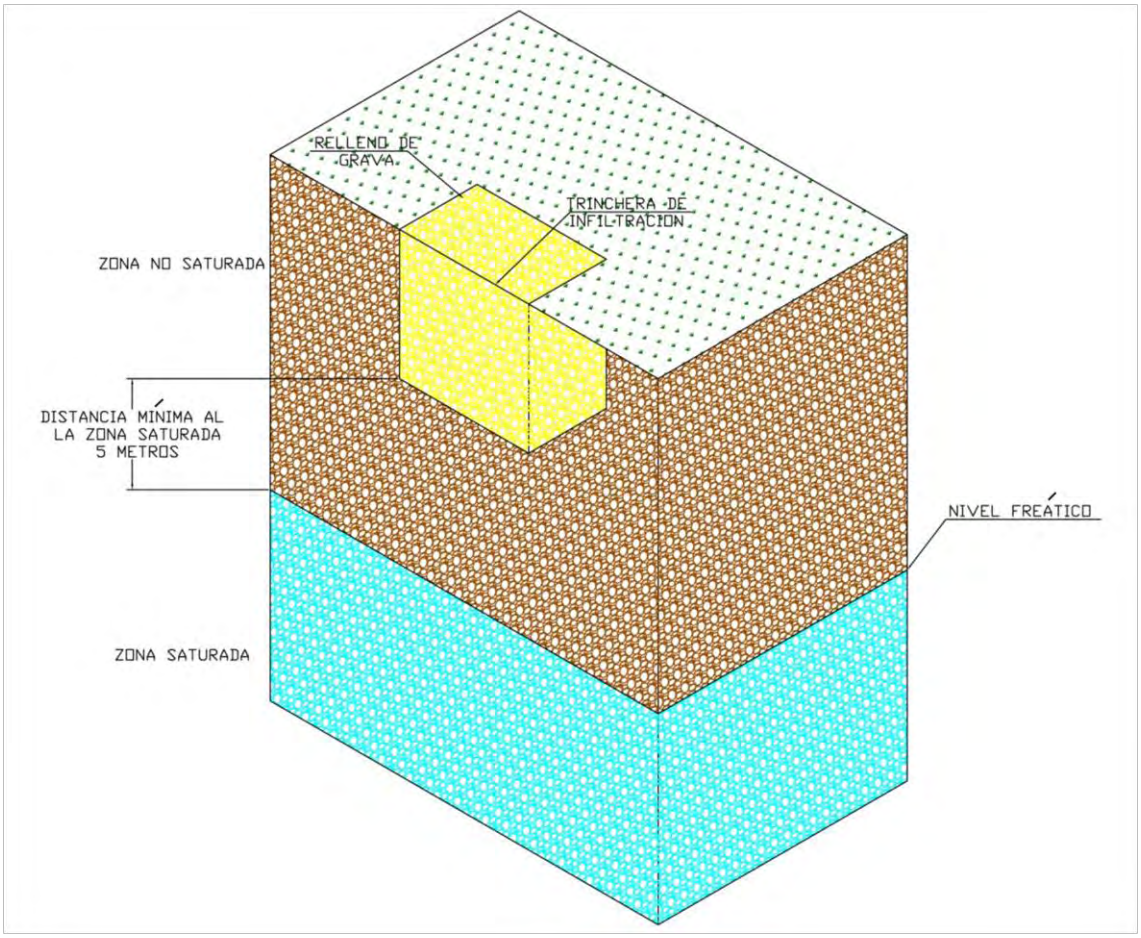
Como se mencionó anteriormente, el agua subterránea es un recurso que una vez afectado, no puede recuperar su calidad inicial fácilmente.

Si no se tienen los cuidados necesarios para ubicar un dispositivo de infiltración o construirlo, puede convertirse en un punto de ingreso de contaminación al subsuelo. Debido a esto, en la normatividad se establece una distancia mínima entre el fondo de los dispositivos de infiltración y el nivel freático. La EPA sugiere una separación de al menos 1.2 metros (4 pies), mientras que la CONAGUA, en la NOM-015-CONAGUA-2007 establece una separación mínima de 5 metros.

Para estimar la profundidad del nivel freático con una exactitud aceptable, deberán verificarse los niveles dinámico y/o estático en pozos o piezómetros cercanos al sitio propuesto.

[25] New York State Stormwater Desing Manual.

Figura 4.3 Distancia al nivel freático. Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Conos de abatimiento

Como otro criterio de ubicación para la infiltración artificial de agua de lluvia, se propone construirlos cerca de conos de abatimiento de los niveles piezométricos, para que así el agua sea succionada por el efecto que causan los pozos de la zona y sea posible acelerar la incorporación del agua al sistema acuífero. Esta condición no es necesario que se cumpla para determinar la ubicación de un dispositivo de infiltración, ya que no en todas las zonas se tendrá un cono de abatimiento cercano.

4.2.4. Integración al paisaje

Como se mencionó anteriormente, los dispositivos de infiltración deberán integrarse al entorno de tal manera que cumplan también una función ornamental, o bien que durante la época de estiaje no se conviertan en un objeto que agreda visualmente a la comunidad. Sobre este punto se muestran

a continuación algunas imágenes de dispositivos de infiltración que se diseñaron para estar acordes con los sitios donde eran necesarios.

Figura 4.4 Trinchera de infiltración ubicada en un estacionamiento.

Fuente: Portland Stormwater Management Manual.

4.3. Dimensionamiento

4.3.1. Evento de Diseño

4.3.1.1. Período de retorno

Los sistemas de alcantarillado pluvial se diseñan para desalojar los escurrimientos provocados por un evento de precipitación determinado, con un periodo de retorno[26] que varía en función del tipo de vialidad o zona donde se encuentran.

[26] El periodo de retorno de un evento hidrológico se define como el intervalo promedio de tiempo dentro del cual ese evento puede ser excedido una vez en promedio.

Figura 4.5 Trinchera de infiltración ubicada en banqueta (1).

Fuente: Portland Stormwater Management Manual.

En el manual de Alcantarillado Pluvial de la Comisión Nacional del Agua se proponen distintos períodos de retorno en función del tipo de infraestructura donde se ubiquen los sistemas para el desalojo del agua pluvial, en la Tabla 4.3 se muestran éstos períodos de retorno para diversos usos de suelo.

Como puede observarse en la tabla anterior, los períodos de retorno están en el intervalo entre 1.5 y 10 años, ya que para estos eventos se tiene un funcionamiento adecuado de los sistemas durante lluvias ordinarias, aunque se tengan encharcamientos e inundaciones que provoquen daños ligeros y molestias a la población durante lluvias extraordinarias.

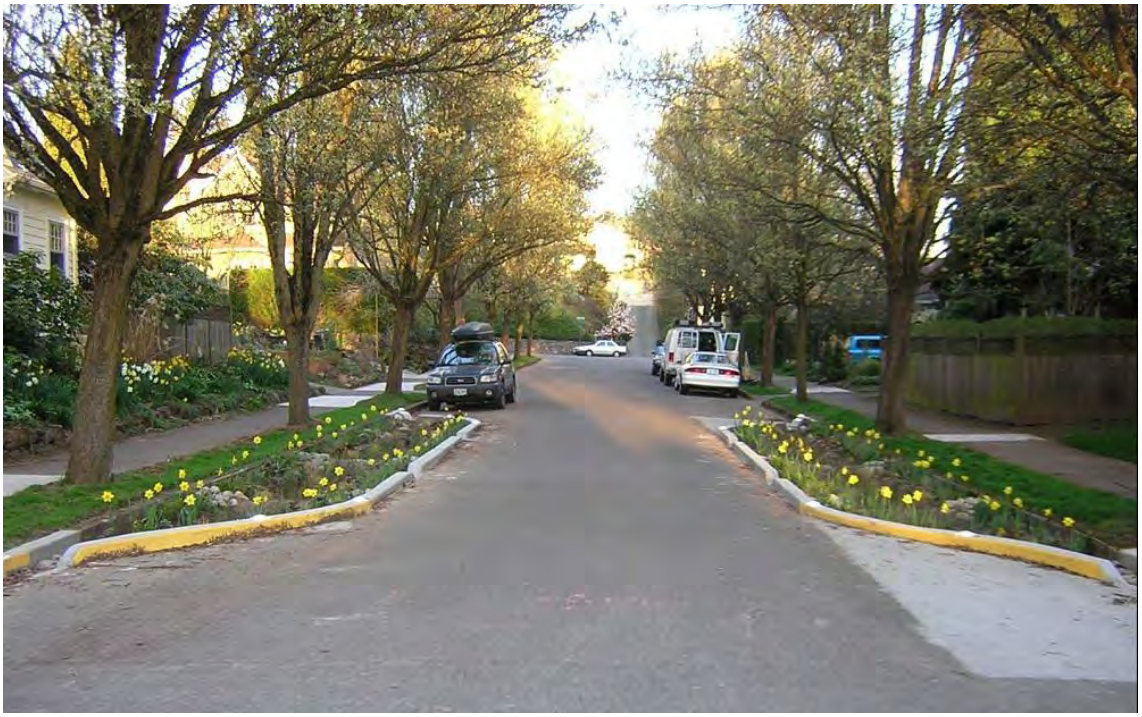
Aunado a ello, para períodos mayores a 10 años, las obras se vuelven más costosas y la mayor parte del tiempo funcionará por debajo de su capacidad, por lo que se ha optado en utilizar períodos más cortos que brindan una protección adecuada para lluvias ordinarias[27].

Por otro lado, en la Tabla 4.4 se muestran los períodos de retorno recomendados para distintos tipos de vialidades.

[27] Alcantarillado Pluvial. Comisión Nacional del Agua. P. 192.

Con base en la información mostrada anteriormente se deberá elegir un período de retorno adecuado para el diseño de las obras de infiltración en función de la infraestructura aledaña a la que brindará servicio.

Figura 4.6 Trinchera de infiltración ubicada en banqueta (2).



Fuente: Portland Stormwater Management Manual.

4.3.1.2. Relaciones Intensidad-Duración-Frecuencia

En cuestión de proyectos de diseño hidrológico como es el diseño de infraestructura pluvial, dentro de las primeras actividades que deben llevarse a cabo es la determinación del evento de diseño. La forma más común de hacerlo es utilizar una tormenta de diseño o un evento que involucre una relación entre la intensidad de lluvia (o profundidad), la duración y las frecuencias o períodos de retorno apropiados para la obra y el sitio. La intensidad es la tasa temporal de precipitación, es decir, la profundidad por unidad de tiempo.

Las relaciones de intensidad-duración-frecuencia pueden expresarse como ecuaciones, a fin de evitar la lectura de intensidades de lluvia en gráficas. La ecuación general para expresar estas relaciones es

$$i = \frac{kT^m}{(d+c)^n}$$

donde k, m, n y c son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple.

Figura 4.7 Trinchera de Infiltración habilitada como jardinera (1).

Fuente: Portland Stormwater Management Manual.

Debido a que para cada caso en particular, se debería llevar a cabo un análisis detallado de la información pluviométrica existente, siendo un proceso que consume gran cantidad de tiempo, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ha publicado isoyetas de precipitación[28], con eventos de precipitación para distintos períodos de retorno y duración para todos los estados de la República Mexicana. Para realizar una estimación de manera rápida y eficaz, ésta información brinda un apoyo para el predimensionamiento de estructuras. En la Figuras 3.11 a 3.13 se muestran las isoyetas de precipitación para el Estado de Guanajuato, con un evento de diseño de dos horas de duración y distintos períodos de retorno.

[28] http://dgst.sct.gob.mx/fileadmin/Isoyetas/.

En el anexo 7.1 se describe la metodología que se utilizó para obtener la ecuación de Intensidad-Duración-Frecuencia para el municipio de León, en la zona urbana, correspondiendo la información utilizada a la estación Los Castillos.

$$I_t^T = \frac{1544.07 * \log\left(10^{0.49} T^{0.51}\right)}{(t+10)^{0.82}}$$

4.3.2. Metodología para el dimensionamiento

A continuación se describen los pasos básicos para el dimensionamiento de estructuras de infiltración, similar al utilizado para dimensionamiento de obras de captación y conducción de agua pluvial convencionales.

1. Como primer paso para el dimensionamiento de una estructura de infiltración o captación de agua pluvial, deberá definirse la microcuenca o área de aportación.

2. Una vez que se ha definido el área de aportación, se deberá trazar la trayectoria más larga hacia el punto de captación.

3. Con base en la trayectoria definida, se deberá determinar la pendiente media de la trayectoria de escurrimiento. Como en las vialidades por donde escurre el agua no se tiene una pendiente constante, deberá dividirse la trayectoria para poder obtener una ponderación de la pendiente, mediante la ecuación siguiente.

$$S = \frac{L}{\frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{l_3}{\sqrt{S_3}} + \cdots + \frac{l_n}{\sqrt{S_n}}}$$

donde

S es la pendiente media del escurrimiento;

L es la longitud total de la trayectoria en metros;

S_i pendiente del tramo i;

li longitud del tramo i.

Se calcula el tiempo de concentración con la ecuación de Kirpich

$$t_{cs} = 0.0003245 \left(\frac{L}{S}\right)^{0.77}$$

donde

L es la longitud de la trayectoria;

S la pendiente media en decimales y

t_{cs} el tiempo de concentración superficial en horas.

Figura 4.8 Trinchera de Infiltración habilitada como jardinera (2).

Fuente: Portland Stormwater Management Manual.

5. Se iguala el tiempo de concentración superficial a la duración del evento de diseño y con la ecuación de Intensidad-Duración-Frecuencia se estima la intensidad de precipitación.

6. Se estima el gasto pluvial con la ecuación del método racional

$$Q = 2.778 * C * i * A$$

donde

Q es el gasto de escurrimiento, en m^3/s;

C - coeficiente de escurrimiento;

i - intensidad de precipitación, mm/h;

A - área de aportación, en hectáreas.

Figura 4.9 Filtro de arena como lecho de infiltración (1).

Fuente: Portland Stormwater Management Manual.

7. Una vez que se tiene el gasto pluvial que llegará al punto de captación ya se podrán definir las dimensiones de la obra, de tal manera que sea capaz de desalojar el caudal de diseño.

Figura 4.10 Filtro de arena como lecho de infiltración (1).

Fuente: Portland Stormwater Management Manual.

Tabla 4.3 Periodos de Retorno para Diseño de Sistemas de Alcantarillado Pluvial.

Tipo de uso de suelo	Período de retorno (años)
Zona comercial	5
Zona industrial	5
Edificios públicos	5
Zona residencial multifamiliar de alta densidad (> 100 hab/ha)	3
Zona residencial unifamiliar y multifamiliar de baja densidad	1.5
Zona recreativa de alto valor e intenso uso por el público	1.5
Otras áreas recreativas	1

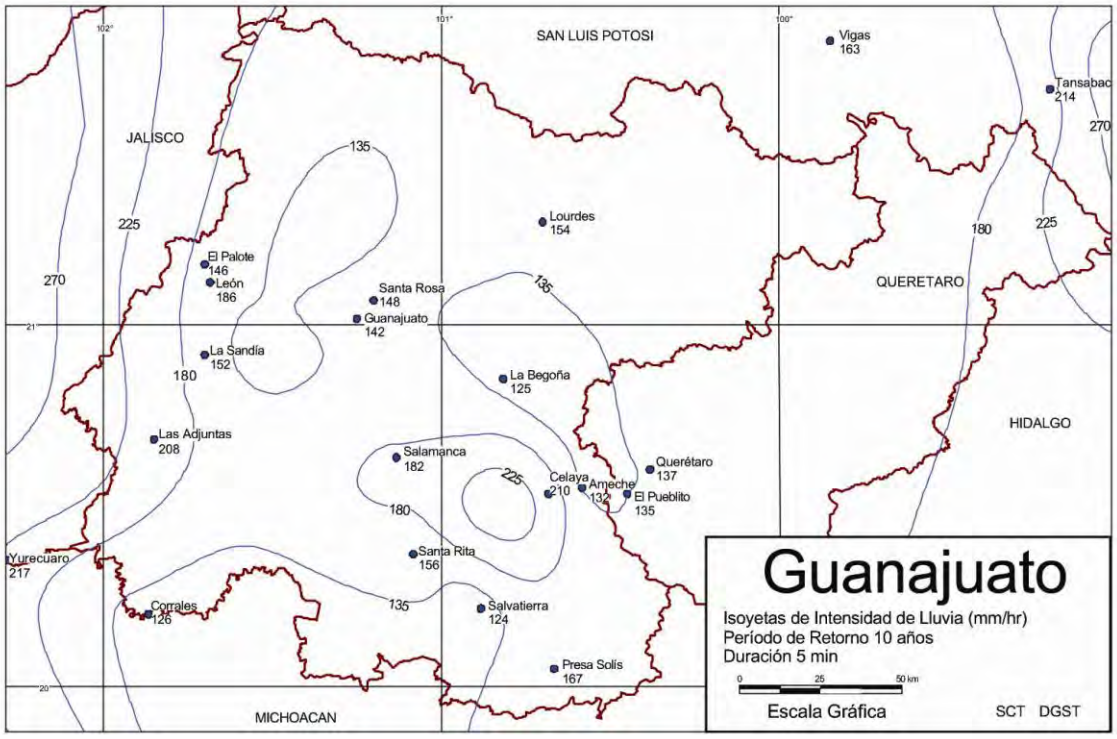
Fuente: CONAGUA.

Tabla 4.4 Periodos de Retorno para Diseño de Sistemas de Alcantarillado Pluvial.

Vialidad	Período de retorno (años)
Arteria – Autopistas urbanas y avenidas que garantizan la comunicación básica de la ciudad	5
Distribuidora – Vías que distribuyen el tráfico proveniente de la vialidad o que la alimentan	3
Local – Avenidas y calles cuya importancia no traspasa la zona servida	1.5
Especial – Acceso a instalaciones de seguridad nacional y servicios públicos vitales	10

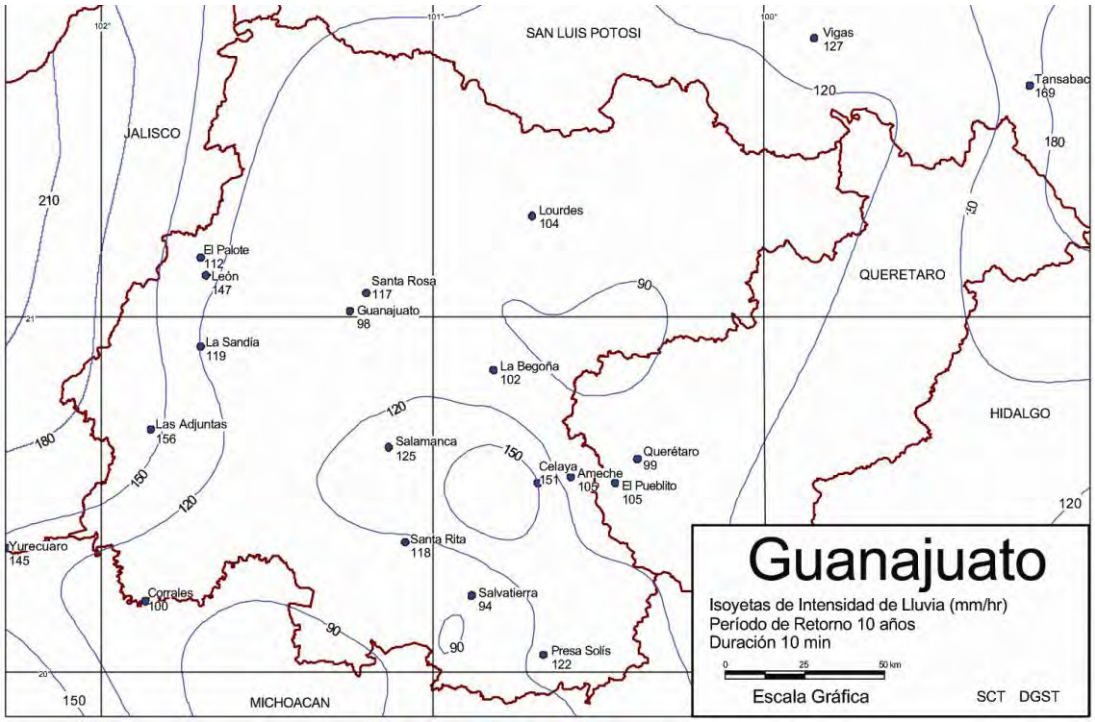
Fuente: CONAGUA.

Figura 4.11 Isoyetas de precipitación en el estado de Guanajuato para una tormenta de 5 minutos de duración con un período de retorno de 10 años.



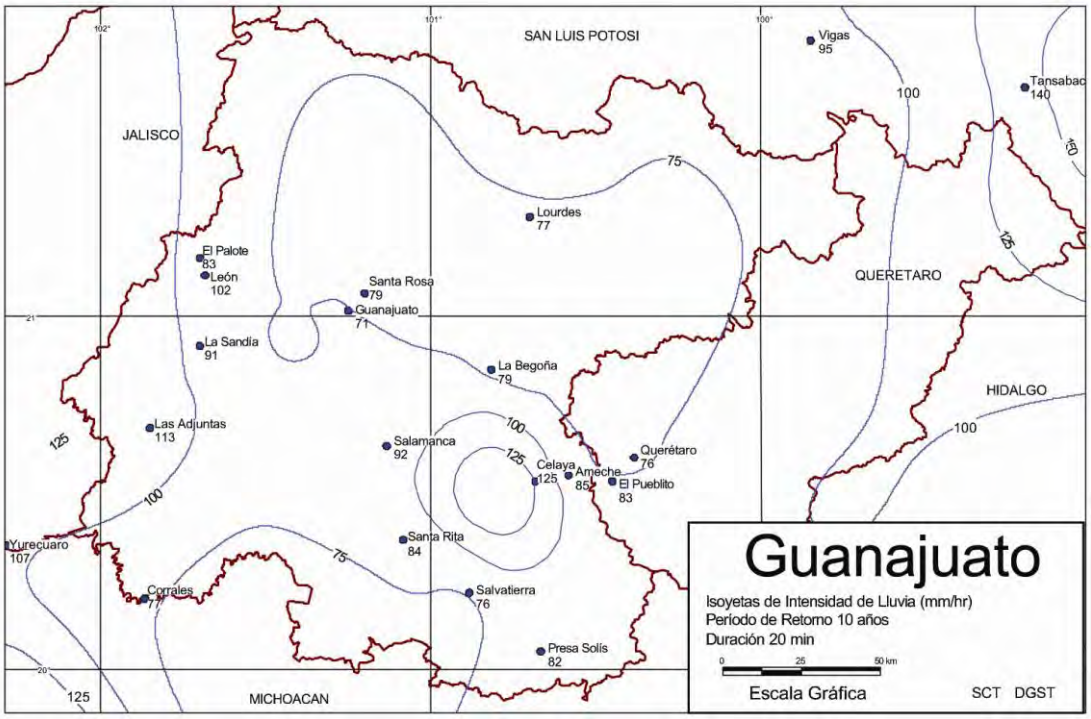
Fuente: SCT

Figura 4.12 Isoyetas de precipitación en el estado de Guanajuato para una tormenta de 10 minutos de duración con un período de retorno de 10 años.



Fuente: SCT

Figura 4.13 Isoyetas de precipitación en el estado de Guanajuato para una tormenta de 20 minutos de duración con un período de retorno de 10 años.



Fuente: SCT

5. Estudio caso: León, Guanajuato.

Se debe hacer todo tan sencillo como sea posible, pero no más sencillo.

Albert Einstein

Desde la década de los años 50, el municipio de León, Guanajuato se ha convertido en un importante polo de desarrollo en la zona del Bajío, atrayendo inversiones para las áreas industrial y agrícola principalmente. Es el corredor industrial más importante de la región y una de las zonas agrícolas más productivas del país, llegando a ser conocido como el granero de México por su importante producción.

Al ser un centro de trabajo, la zona urbana del municipio de León se ha expandido hacia las áreas de cultivo y parte serrana. El proceso de urbanización ha modificado el ciclo hidrológico local, incrementado las zonas impermeables de la región, haciendo más intensos los escurrimientos de agua pluvial, provocando inundaciones y encharcamientos en los puntos más bajos, afectando continuamente a la población. Ésta problemática ha rebasado la capacidad de desalojo de los sistemas de alcantarillado, que no han sido diseñados considerando las nuevas áreas de aportación y escurrimiento.

Por otro lado, el desarrollo económico de la región ha generado el incremento en la demanda de agua para las distintas actividades productivas. Por lo cual es necesario llevar a cabo acciones encaminadas a garantizar su preservación y abastecimiento.

El agua de lluvia ha sido hasta ahora un recurso no utilizado, aún teniendo el conocimiento de que su calidad la hace aceptable para consumo humano; convirtiéndola además, en un recurso aprovechable para infiltración directa o inducida con el fin de contribuir a la dinámica de recarga. Sin embargo, es importante considerar que la calidad del agua puede ser modificada en función de efectos antropogénicos de la zona donde precipita. Y como se mencionó, se debe tomar en cuenta la problemática y deberá ser solucionada como parte de un esquema de manejo de cuencas.

En este trabajo se hace una propuesta del aprovechamiento de agua pluvial en planicies y/o zonas serranas del municipio de León, mediante la implementación de sistemas que permitan mejorar su calidad para posteriormente inducir su infiltración al subsuelo y de ésta manera permitir su incorporación a los acuíferos locales.

5.1. Zona de Estudio

5.1.1. Ubicación

En el estado de Guanajuato el 60% de la superficie, corresponde a zonas montañosas que actúan como las principales zonas de recarga del sistema

acuífero. La superficie restante, llamada el Bajío Guanajuatense, es topográficamente plana y en ésta se asienta la zona del municipio de León. Se ubica en la zona poniente del estado y colinda con los municipios de San Felipe, Guanajuato, Silao, Romita, San Francisco del Rincón y con el Estado de Jalisco, Figura 5.1. El municipio de León, contaba en el año 2005[29], con una población de 1,317,465 habitantes. Su territorio comprende una superficie[30] de 1,883.20 km^2.

Con el objetivo de situar en un contexto general la problemática, se describe a continuación de manera breve la fisiografía, hidrografía y geología de la zona.

Figura 5.1 Ubicación del municipio de León.

Elaborado con información de INEGI, 2005.

[29] II Conteo de Población y Vivienda, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2005
[30] Fuente: E-local. http://www.e-local.gob.mx

5.1.2. Fisiografía

El área de estudio queda comprendida dentro de dos grandes provincias fisiográficas: La Mesa central y el Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana. Esta última provincia representa la mayor parte de la superficie, mientras que el dominio de la Mesa Central está restringido a la Sierra de Guanajuato[31].

En el área el principal rasgo orográfico está constituido por la sierra de Guanajuato. Ésta sierra tiene aproximadamente 85 Km de longitud y una anchura de entre 15 y poco más de 20 Km. Se alza a unos 12 Km al Este de Lagos de Moreno y se extiende en dirección SE por la zona norte de León hasta cerca de 15 Km hacia el SE de la ciudad de Guanajuato[32].

La Figura 4.2 presenta un mapa fisiográfico de la zona de estudio y área circundantes. En el mapa se señalan las divisiones correspondientes a las provincias y subprovincias fisiográficas que se encuentran en el área de estudio (según las claves y divisiones utilizadas por el INEGI), así como los diferentes sistemas de topoformas que se hallan en ellas.

El área correspondiente a la Mesa del Centro incluye solamente a la subprovincia de Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato o Altos de Guanajuato, en tanto que las porciones centro, sur y poniente del área pertenecientes a la Faja Volcánica Mexicana[33], quedando incluidas casi enteramente en la subprovincia del Bajío Guanajuatense, .

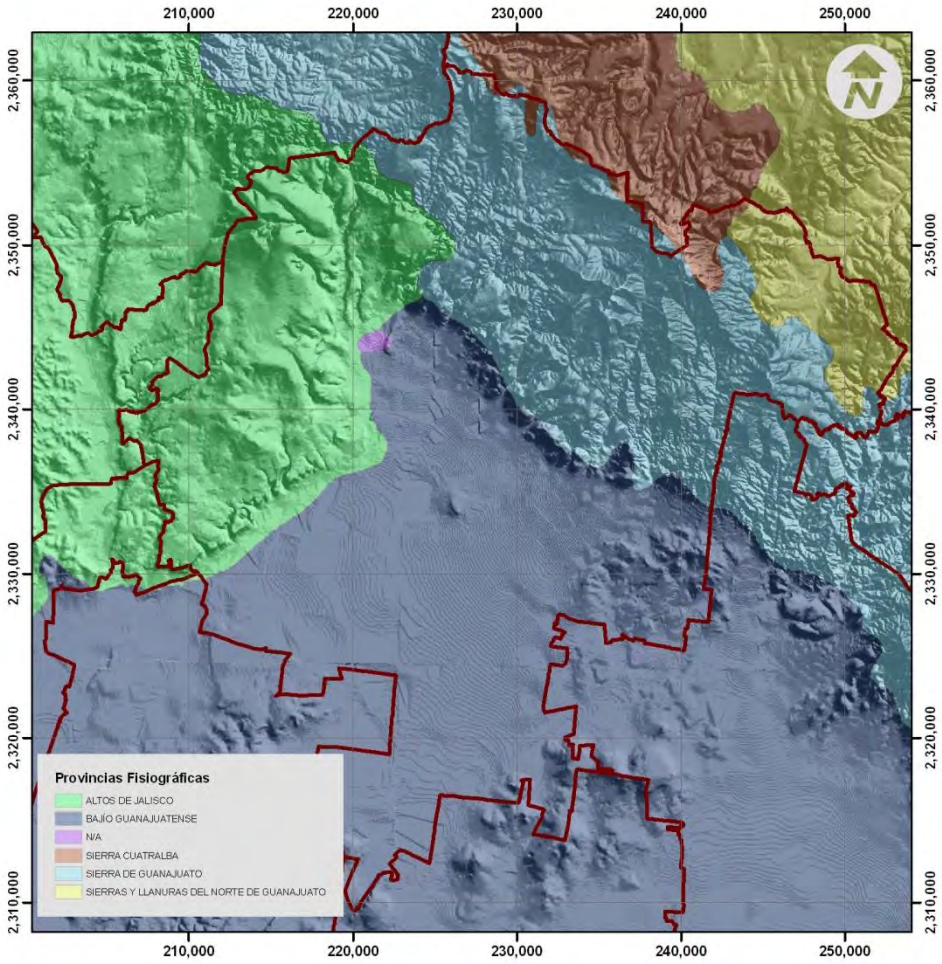
Aparecen en el mapa zonas y claves pertenecientes a la subprovincia de los altos de Jalisco, que también es parte de la provincia del Eje Volcánico, aunque ésta subprovincia ya no está dentro de los límites del área de estudio, sino que forma parte de la subcuenca del Río Turbio[34].

La orientación de los elementos orográficos del área está estrechamente relacionada con las principales estructuras regionales que influyen fuertemente en los patrones de escurrimiento. De esta manera, son de notar las orientaciones NW-SE, como la sierra de Guanajuato así como de una serie de

[31] COREMI, 2004.
[32] Ídem.
[33] Salas, p. 12.
[34] Ídem.

aparatos volcánicos Plio-Cuaternarios[35]. Otros focos de este tipo se encuentran formando lomeríos dispersos en la zona NW del valle de Silao-Romita.

Figura 5.2 Mapa fisiográfico de la zona.



Fuente: Elaborado con información de INEGI.

Estos aparatos se aprecian formando pequeños grupos separados entre sí, distribuidos según una dirección NW-SE. A su vez cada uno de estos grupos de aparatos muestra una alineación ENE-WSW en el extremo oriente del área.

No son raros también los rasgos topográficos alineados según una dirección muy próxima a NE-SW, presente tanto en la sierra de Guanajuato como en la parte media y sur, en grupos de aparatos volcánicos recientes. Esta misma orientación se puede apreciar de manera muy clara en grandes valles tectónicos fuera del área de estudio, como ocurre al norte de la sierra de Guanajuato, en el Valle de Villa de Reyes.

[35] Terrenos correspondientes al Plioceno (último periodo del Terciario o Cenozoico) y al Pleistoceno o Cuaternario.

5.1.3. Geomorfología

Las distintas formas de relieve en el área son reflejo y consecuencia de la historia geológica de la región. Las unidades geológicas, al igual que las topoformas derivadas de ellas pueden agruparse en dos dominios. Por una parte se tienen sierras altas y bajas bastante disectadas, así como lomeríos de formas suaves que acusan una historia de erosión e intemperismo[36]. Por otro lado, se tienen formas más juveniles, consistentes en mesas, abanicos aluviales[37], planicies de rellenos sedimentarios, así como algunas sierras altas, bajas y lomeríos de origen volcánico que muestran redes de drenaje poco desarrolladas[38].

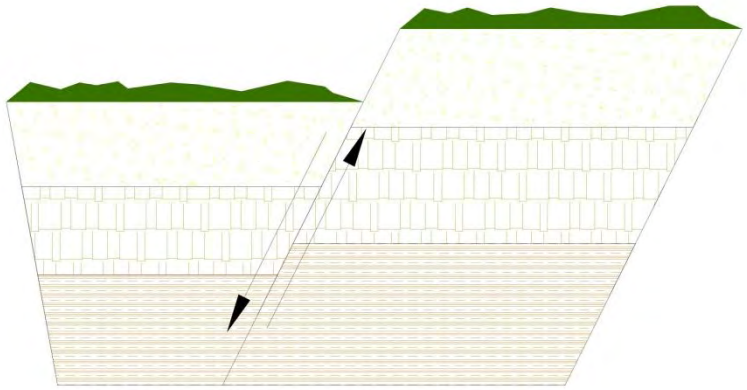
El primer grupo de topoformas se presenta principalmente en la sierra de Guanajuato, ubicada en la parte Norte y NE del área; correspondientes a las unidades geológicas más antiguas, de la era Mesozoica[39] y de la base del Terciario[40]. Estas unidades incluyen rocas metasedimentarias volcanoclásticas[41], e intrusivas principalmente, así como volúmenes menores de conglomerados. La Sierra de Guanajuato se extiende a lo largo de una franja de orientación general NW-SE, coincidente con trazas de fallamientos de tipo normal e inverso. Dentro de la misma sierra pueden observarse cañadas subparalelas de orientación NE-SW, perpendiculares al tren general de la sierra[42].

En las unidades más antiguas en la sierra de Guanajuato, el patrón de drenaje es dendrítico[43] y bastante denso aunque se nota claramente la influencia de las grandes fracturas y fallas mencionadas anteriormente. El drenaje es claramente más denso en las unidades geológicas mencionadas que en las rocas más recientes; sin embargo dentro de la misma sierra, se encuentran algunos cuerpos de basaltos y rocas ácidas del Terciario Superior y Cuaternario cuya morfología contrasta con la de las unidades subyacentes.

[36] Es el proceso o grupo de procesos por los cuales las rocas expuestas a agentes atmosféricos en la superficie terrestre o cerca de esa, cambian en color, textura, composición, dureza o forma con o sin transporte de material.
[37] Una extensión de material sobre la ladera de un alto topográfico, con forma de un abanico abierto o un segmento de un cono, depositado por una corriente o deslizamiento de material ocasionado por una o varias corrientes de agua.
[38] COREMI, 2004.
[39] Era geológica que va desde el final del Paleozoico hasta el Cenozoico, se inició hace 225 millones de años y finalizó hace 65 millones de años.
[40] Primer período de la era Cenozoica (antes del Cretácico de la era Mesozoica y antes del Cuaternario). Se divide en cinco épocas: Paleoceno, Eoceno, Oligoceno, Mioceno y Plioceno.
[41] Material arrojado durante una erupción ya sea en estado sólido o líquido.
[42] COREMI, 2004.
[43] En este tipo de drenaje se desprenden corrientes en múltiples direcciones, asemejando a las ramas de un árbol.

En las rocas del Terciario Inferior es frecuente observar cañones, escarpes y grandes peñas de bordes redondeados. Estas formas son en parte reflejo de los fallamientos ocurridos a lo largo del período Terciario así como de la erosión y diaclasamiento[44] de los frentes volcánicos. Este tipo de relieve se puede apreciar en los alrededores de la ciudad de Guanajuato así como en las sierras que se extienden hacia el SE de la misma ciudad.

Figura 5.3 Falla normal



Elaboración propia

Una falla normal está formada por bloques de la corteza desplazados hacia abajo debido a la influencia de la gravedad donde las rocas se fracturan y se estiran como para ganar espacio.

En el área remanente se presentan formas con características más juveniles asociadas a materiales volcánicos del Terciario Medio al Cuaternario, así como a depósitos y rellenos aluviales. Al oriente del área de estudio pueden observarse formas de relieve más recientes constituidas por rocas volcánicas ácidas[45].

Estas sierras alcanzan alturas de casi 2,600 m y muestran drenaje poco desarrollado así como formas abruptas de cumbres angulosas. Los cerros llegan a tener alturas considerables, de hasta cerca de 500 m por encima del nivel de base circundante; presentan a menudo formas abruptas o laderas tendidas disectadas por pequeños cañones. También se encuentran mesas de materiales piroclásticos disectadas por drenes subparalelos, controlados por grandes fracturas (NE-SW), así como por la suave pendiente de las mesas.

[44] El diaclasamiento es una fractura en las rocas que no va acompañada de deslizamiento de bloque que determina, no siendo el desplazamiento más que una mínima separación transversal.
[45] Ver anexo A.2.3

En la zona Norte y parte del centro del área se presenta en general un desarrollo geomorfológico de madurez con zonas recientes hacia la parte sur; estas últimas manifestadas por la presencia de aparatos volcánicos cuaternarios así como por el retrabajo de algunos depósitos aluviales terciarios y cuaternarios.

Dentro de las predominantes formas juveniles se presentan mesetas volcánicas, sierras y lomeríos de rocas ácidas intermedias y básicas terciarias y cuaternarias con aparatos volcánicos que cubren a rocas sedimentarias y metamórficas; la denudación[46] de estas formas ha originado rellenos sedimentarios, en ocasiones de tipo lacustre y fajas de abanicos aluviales.

Los rellenos sedimentarios recientes conforman zonas llanas o de suaves lomeríos, como ocurre con los valles de León y Silao-Romita, Figura 5.6 .

Son comunes también los edificios y formas volcánicas definidas por aparatos de forma cónica de composición básica e intermedia, volcanes y mesas derivadas de material piroclástico y derrames, así como cuencas lacustres. Estos rasgos se presentan hacia la parte sur del área en las cercanías de Irapuato y alrededores de Huanímaro.

Los cerros, mesas y lomeríos que constituyen las líneas de parteaguas en la parte Sur, SE y SW de la subcuenca del río Guanajuato, los cuales corresponden a materiales volcánicos del Terciario Superior y Cuaternario. En estas formas de relieve la red de drenaje es pobre o casi inexistente, aunque se aprecian algunas cañadas de claro control estructural de orientación ENE-WSW y en menor medida, E-W y N-S.

Las mesas se presentan en posición casi horizontal o levemente basculada y disectadas por corrientes fluviales de tipo consecuente y subsecuente. Estas formas se observan en toda el área, incluso hacia ambas vertientes de la sierra de Guanajuato, donde coexisten con un paisaje más antiguo[47].

5.1.4. Geología Local

La sierra de Guanajuato y sus alrededores están constituidos por dos conjuntos litológicos[48] uno inferior del Mesozoico y otro superior del Cenozoico[49],

[46] Desprendimiento de la parte más externa de la corteza terrestre, provocada por la acción erosiva de los agentes geológicos externos.
[47] COREMI, 2004.
[48] La litología es el estudio de las rocas en términos de su estructura, color, grueso, composición mineral, tamaño de grano. Es decir las características que hacen identificable a una roca.

definidos por un conjunto de diversa litología y separados por un intrusivo granítico terciario[50]. La unidad litoestratigráfica inferior está representada por una secuencia de facies sedimentarias y volcánicas marinas de edad cretácica, deformadas, metamorfoseadas e intrusionadas, primero por un complejo plutónico de composición intermedia a ácida[51] y posteriormente por un intrusivo de constitución granítica con dimensiones batolíticas[52] y que ocupa la parte central de la Sierra de Guanajuato. Además se tiene una unidad ultramáfica[53], serpentinizada[54], alóctona[55], de edad probablemente jurásica[56] tardía[57].

La unidad litoestratigráfica superior cubre en discordancia angular[58] a las rocas mesozoicas y está representada por facies volcánicas de composición ácida a intermedia de edad terciaria, principalmente del oligoceno[59]. En la base se encuentra una unidad sedimentaria clástica continental de edad eocénica[60], y hacia la cima derrames basálticos pliocuaternarios finalizando con depósitos de aluvión.

Los depósitos continentales están distribuidos en el Valle León-Río Turbio, estando constituidos por conglomerados aluviales sin consolidar con clastos de ignimbrita[61], andesita[62], cuarzo[63] e intercalaciones de arenisca y calizas lacustres.

[49] Ver anexo A.2.1.
[50] Martínez-Reyes, 1992.
[51] Ver anexo A.2.3.
[52] Una gran masa ígnea intrusiva irregulares, generalmente de granito, cruzan las rocas circundantes y estructuras. Cuenta con paredes muy inclinadas y un techo en forma de cúpula.
[53] Ver anexo A.2.3
[54] La serpentinización es el proceso de alteración hidrotermal, en la cual los minerales de silicio ricos en magnesio son convertidos o reemplazados por minerales de serpentina, los cuales tienen la siguiente fórmula $(MgFe)_3Si_2O_5(OH)_4$.
[55] Se refiere a materiales que se han originado en otros lugares.
[56] Ver anexo A.2.1
[57] COREMI, 2004.
[58] Se refiere a discontinuidades que separan dos unidades estratigráficas superpuestas en las que no hay paralelismo de capas, de manera que la unidad inferior tiene un mayor grado de deformación (plegamiento o basculamiento) que la unidad superior, con respecto a la superficie de discontinuidad.
[59] Ver anexo A.2.1
[60] Ver anexo A.2.1
[61] Roca formada por la deposición generalizada y la consolidación de los flujos de ceniza y nubes ardientes.
[62] La andesita es una roca ígnea volcánica de composición intermedia. Su composición mineral comprende generalmente plagioclasa, piroxeno y/u hornblenda. Frecuentemente están asociados biotita, cuarzo, magnetita y esfena. El feldespato está ausente en esta roca. Su nombre deriva de los Andes, cordillera montañosa que corre paralela a las costas desde Venezuela hasta Patagonia. La andesita puede tener colores como el negro azabache a verde plomizado según su constitución.

En la cartografía del área estudiada se manifiesta la presencia de trece unidades litoestratigráficas de diversa naturaleza. A continuación se hace una descripción y presentación de cada una de ellas. En la Figura 5.5 se puede observar la distribución de las formaciones geológicas en el área de estudio.

5.1.4.1. Sistema Jurásico

5.1.4.1.1. Piroxénita San Juan de Otates (Jpsj).

Nombre asignado por Servais et. al., 1982. Esta unidad aflora en la Sierra de Guanajuato, a lo largo del arroyo San Juan de Otates, al noreste de la ciudad de León, con una extensión superficial aproximada de 12.5 km^2.

La unidad consiste en rocas masivas cristalina de color verde obscuro en una roca alterada (serpentinizada). Su paragénesis[64] está representada por augita[65], olivino[66], tremolita-actinolita[67] y hornblenda[68] como minerales primarios y como minerales secundarios o de alteración, antigorita[69], clorita[70], talco[71] y minerales opacos. Son rocas con metamorfismo regional de bajo grado y una importante alteración hidrotermal.

Este complejo ultramáfico sobreyace tectónicamente a rocas metavolcánicas de la unidad complejo sedimentarios Sierra de Guanajuato, como consecuencia

[63] Sílice cristalina, que es un importante formador de rocas SiO2. Junto con el feldespato, es uno de los minerales más comunes. Aparece como cristales hexagonales traslucidos sin color, o coloreado cuando contiene impurezas

[64] Unión de uno o varios minerales en una roca

[65] La augita es un mineral del grupo de los Silicatos, subgrupo Inosilicatos y dentro de estos es del tipo piroxenos por ser inosilicatos de cadena sencilla. Es un aluminosilicato de hierro, calcio y magnesio, con otros iones metálicos como posibles impurezas. Suele tener color casi negro.

[66] El olivino o peridoto es un mineral del grupo de los silicatos. Es un neosilicato de hierro y magnesio. Es normalmente verde parduzco y se halla en las rocas de origen magmático, en las zonas de rift, en los basaltos. Se forma por cristalización de magmas básicos o ultrabásicos.

[67] La tremolita se forma por metamorfismo a partir de sedimentos ricos en dolomita y en cuarzo. La tremolita es un indicador del grado del metamorfismo ya que a elevadas temperaturas se convierte en diópsido.

[68] Es el mineral más común del grupo de los anfíboles Es comúnmente negro, verde oscuro o café y ocurre en cristales monoclínicos o columnares, fibrosos, o de forma granular. Es uno de los componentes principales de rocas ácidas, intermedias, rocas ígneas (granito sienita, diorita y andesita) y menos común en rocas ígneas básicas; es mineral común en rocas metamórficas como el gneiss y esquisto.

[69] Mineral que se presenta en forma de láminas de color marrón verdoso del grupo de las serpentinas, $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$.

[70] Un grupo mineral laminar, monoclínico, verdoso cuya fórmula general es (Mg, Fe^{+2}, Fe^{+3})$_6AlSi_3O_{10}(OH)_8$. Se caracteriza contener hierro ferroso y por la ausencia de calcio y álcalis; el cromo y el manganeso pueden estar presentes. La clorita está relacionada con las micas y se considera como minerales de arcillas.

[71] Es un mineral extremadamente suave, de color verde claro o gris, $Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$. Tiene una característica jabonosa y textura grasienta y una dureza de 1 en la escala de Mohs, y es fácil de cortar con un cuchillo.

de un cabalgamiento[72] de naturaleza ofiolitica[73] y está cubierta en su extremo norte por productos volcánicos terciarios. En ocasiones, la piroxenita está cortada por diques[74] de diversa composición de la unidad Conjunto Plutónico La Luz[75].

3.1.4.2. Sistema Cretácico

3.1.4.2.1. Complejo Volcanosedimentario Sierra de Guanajuato (Kcsg).

Esta unidad aflora a lo largo de la sierra y ha sido dividido en dos componentes que presentan diferencias litológicas.

- Componente sedimentario. Representado por lutitas, calizas, areniscas y conglomerados.
    - Las lutitas y calizas se presentan en estratos delgados y alternancias rítmicas; las primeras tienen una composición limo-arcillosa o cuarzo argiláceo-clorítica en donde están aislados clastos de naturaleza cuarzosa o feldespática[76]. Las calizas presentan una fina laminación en donde niveles limosos de composición cuarzo-carbonática se intercalan con niveles calcáreo-argiláceos de lodo calcáreo[77] y minerales arcillosos cloritizados, aunque existen también calizas de puro lodo calcáreo.
    - Las areniscas se presentan en mayor cantidad y son de color verde, en estratificación gradada. Texturalmente pueden ser clasificadas como grawacas[78], con fragmentos de naturaleza lítica o cuarzosa, escasamente feldespática. La matriz es argilácea, cloritizada con algún componente limoso subordinado[79].

[72] Un cabalgamiento es un tipo de falla inversa, una rotura en la corteza de la Tierra a través de la cual se ha producido un desplazamiento relativo, en el que las rocas de posición estratigráfica inferior son empujadas hacia arriba, por encima de los estratos más recientes. Las fallas de cabalgamiento son el resultado de fuerzas de compresión.
[73] Las ofiolitas son asociación de rocas ultramáficas, máficas y máfico volcánicas constituyentes de la corteza oceánica y que pueden aparecer dispuestas en la corteza continental como consecuencia de un fenómeno de obducción (choque de continentes).
[74] En geología, un dique es una formación ígnea intrusiva de forma tabular.
[75] Salas, p. 29.
[76] Grupo de minerales formadores de rocas, $MAl(Al, Si)_3O_8$, donde M=K,Na,Ca,Ba,Rb,Sr y Fe. Son el grupo mineral más amplio y constituye el 60% de la corteza terrestre.
[77] Sustancia que contiene carbonato de calcio, implica que la roca contiene al menos 50% de éste mineral.
[78] Una grawaca es una roca detrítica formada por la consolidación de los minerales que resultan de la descomposición del granito.
[79] Salas, p. 30.

- Los conglomerados son muy escasos, en bancos gruesos, de color verde, con clastos bien redondeados de naturaleza ígnea, sedimentaria y metamórfica[80].

- Componente volcánico. Se caracteriza por la presencia de lavas de composición basáltica, andesítica y dacítica, generalmente en tonos que varían del verde oscuro, al verde manzana, en estructuras masivas o almohadillas cementadas por material calcáreo, con niveles de brechas[81], tobas[82] y detríticos[83] de la misma composición. Estas rocas presentan plagioclasa (albita)[84], clorita, calcita, minerales opacos y cuarzo.

La paragénesis mineral de esta unidad es compatible con fenómenos de espilitización, metamorfismo regional de bajo grado y alteración hidrotermal (propilitización), sin embargo el fenómeno que más ha afectado a esta unidad es el metamorfismo. En la zona minera de Guanajuato, estas facies han sido denominadas de manera informal como Formación Esperanza (componente sedimentario) considerada como unidad basal y Formación La Luz (componente volcánico) considerada como unidad sobreyacente[85].

5.1.4.1.2. Conjunto Plutónico La Luz (Kcpl).

Con este nombre se señalan diversos afloramientos expuestos del poblado de Duarte y que en conjunto totalizan 14.5 km^2. Se trata de cuerpos plutónicos dioríticos y graníticos que son encajonados en la unidad anterior e intrusionados a su vez por numerosos diques, de los cuales se pueden distinguir:

- Diorita La Palma: Rocas masivas cristalinas, de colores oscuros en un complejo intrusivo que incluye términos dioríticos, microdiotíticos y gabroicos con gran variabilidad estructural. La paragénesis de estas rocas está representada por plagioclasa, hornblenda, clinopiroxeno,

[80] Salas, p. 31
[81] En geología, la brecha es una roca sedimentaria detrítica compuesto aproximadamente en un 50% de fragmentos angulares de roca de tamaño superior a 2 milímetros unidos por un cemento natural.
[82] Término general para las rocas generadas por materiales piroclásticos.
[83] Un término general para rocas sueltas y materiales minerales que se usa fuera o eliminadas por medios mecánicos, como por la desintegración o abrasión, tales como arena, limo y arcilla procedentes de rocas más antiguas y se movió de su lugar de origen
[84]Un grupo de feldespato triclínico de fórmula general (Na,Ca)Al(Si,Al)Si2O8. Sus minerales principales son la albita y la anortita, en los extremos de la serie, teniendo todas las plagioclasas muchas características comunes con ambas.
[85] Salas, p. 31.

cuarzo ocasional, minerales accesorios (apatita y ópalos), actinolita, clorita, epidota y sericita como minerales secundarios.

- Tonalita Cerro Pelón: Rocas Masivas, cristalinas de color blanco, petrográficamente clasificadas como plagiogranitos. Son rocas con texturas holocristalinas, hipidiomórfica-granular, con intercrecimientos mirmekíticos. Su mineralogía incluye oligoclasa, cuarzo, biotita, muscovita, minerales secundarios (clorita, esfena, epidota y sericita) y minerales accesorios de apatita.

Una característica común a esta unidad, es el grado de metamorfismo y alteración que representan dichas rocas. Su edad corresponde al Cretácico Temprano (Martínez, 1992).

5.1.4.2. Cenozoico

Abarca depósitos de ambiente continental, donde diversas fases de volcanismo y plutonismo son acompañadas por fases de sedimentación. Entre el conjunto basal mesozoico y la cubierta volcanosedimentaria cenozoica, se encuentra un intrusivo de composición ácida, conocida como granito Comanja, que aflora a lo largo de casi toda la Sierra de Guanajuato (SG) (Vassallo y Martínez-Reyes, 1996).

5.1.4.2.1. Granito Comanja (tgco).

Nombre asignado por Quintero, 1986. Es un cuerpo intrusivo de dimensiones batolíticas de composición granítica que aflora en toda la Sierra de Guanajuato. Es una roca granítica sin deformación importante, pero que presenta una aureola de metamorfismo de contacto en sus límites con la roca encajonante.

El granito Comanja siempre está aflorando en los sitios donde la cubierta cenozoica ha sido removida por la erosión, quedando afloramientos en los llanos y en los bajos topográficos de la Sierra de Guanajuato[86].

5.1.4.2.2. Andesita Bernalejo

Término utilizado por Quintero, 1986. Esta es un tipo de roca localizado en el poblado de Bernalejo, con una extensión territorial de aproximadamente 9.5 km^2.

Es una roca muy resistente a los procesos erosivos y en ocasiones llega a presentar vesículas y fracturas, alguna veces rellenas de calcita. En el campo

[86] Salas, p. 33.

presenta un color gris oscuro con tonalidades violáceas y el carácter microcristalino de su matriz[87].

5.1.4.2.3. Ignimbrita Cuatralba.

Nombre asignado por Quintero, 1986. Ésta unidad geológica está formada por material piroclástico depositado sobre las rocas antiguas de la Sierra de Guanajuato y está dividida en dos miembros informales:

- Miembro Superior. Toba masiva de color café a crema, poco consolidada compuesta de cenizas, con escasos fragmentos de líticos y pómez, con poca resistencia a la erosión lo que lo hace poco detectable.
- Miembro Superior. ignimbrita riolítica de espesor variable y textura porfirítica, presenta abundancia de fenocristales de cuarzo y escasas plagioclasas empacados en una matriz muy fina. Se pueden observar diaclasas columnares[88] y a diferencia del miembro inferior siempre está presente en los afloramientos de la unidad.

5.1.4.2.4. Basalto Dos Aguas (Tbda)

Nombre dado por Quintero, 1986. Es una estructura de basalto de olivino de color gris oscuro y textura microcristalina, asociado con productos piroclásticos de la misma composición. Esta unidad forma un solo afloramiento continuo, constituyendo una forma topográfica conocida como Cerro Dos Aguas. En la porción central del cerro existe una depresión que parece ser el cráter del volcán y por el cual fueron emitidas las lavas basálticas.

Esta unidad se encuentra interestratificada con la Ignimbrita Cuatralba, y de acuerdo con su posición estratigráfica le corresponde una edad miocénica tardía[89].

5.1.4.2.5. Terciario Granular Indiferenciado (Tgi)

Se le asigna este nombre a todo aquel material continental, exceptuando al aluvión, que aflora en forma de lomeríos redondeados. Esta unidad se compone de:

[87] Salas, p. 35.
[88] Este tipo de fracturamiento ocurre por enfriamiento, como en el caso de las columnas basálticas, formado por coladas basálticas, las cuales una vez solidificada la lava, debido al enfriamiento se dividen en columnas prismáticas.
[89] Salas, p. 36.

- Conglomerados polimícticos de forma masiva y color rojo con clastos que van de subredondeados a redondeados de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.
- Areniscas de colores claros interestratificados en alternancia irregular con limolitas que van de color crema a amarillo y lutitas físiles o compactas que varían de color verde a amarillo, en estratos medios y grado de compactación variable.
- Calizas que varían de microcristalinas a arenosas o arcillas de color crema a café claro y que presentan ocasionalmente nódulos y lentes de sílice con horizontes de margas.

Esta unidad sobreyace a la Ignimbrita Cuatralba discordantemente, subyace al Basalto el Cubilete[90].

5.1.4.3. Cuaternario

5.1.4.3.1. Gabro Arperos

Esta unidad fue nombrada por Martínez, 1987. Es una roca hipabisal de dimensiones considerables, emplazada en las unidades estratigráficas anteriores. Actualmente aflora en el poblado de Arperos y al SW de la población Nuevo Valle de Moreno.

Esta roca es de color café oscuro y textura holocristalina, hipidiomórfica granular con minerales de labradorita, piroxenos, olivino y minerales opacos.

Esta unidad intrusiona en forma de diques de todas dimensiones y en diversos sentidos, desarrollando bordes de enfriamiento en los contactos con las rocas encajonantes. Se le relaciona genéticamente con la unidad Basalto el Cubilete, considerándose a ésta última el elemento extrusivo perteneciente al Gabro Arperos[91].

5.1.4.3.2. Basalto El Cubilete

Afloramientos de basalto de olivino y andesitas de augita, a lo largo de la Sierra de Guanajuato y constituyen las coronaciones de los Cerros El Cubilete y El Gigante, representando las últimas manifestaciones volcánicas de la región[92].

[90] Salas, p. 38.
[91] Salas, p.39.
[92] Martínez, 1992.

5.1.4.3.3. Aluvión

Depósitos sedimentarios no consolidados, que afloran en la planicie del valle, pie de monte y cima de algunas mesetas lávicas. Como producto final del régimen denudatorio. Se considera la unidad con mayor extensión territorial. La edad que se le asigna es del Holoceno por ser el último evento que se produjo[93]. En la Figura 4.6 se puede observar que en el valle se concentra el relleno aluvial.

5.1.5. Meteorología y Clima

El clima del municipio se considera templado. La temperatura media anual es de 19.2 ºC[94], y la precipitación media anual es de 658 mm[95]. En el municipio de León se encuentran ubicadas varias estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional, Figura 5.7, a continuación se presentan temperaturas, precipitación y evaporación medias mensuales de tres de éstas estaciones, Tabla 5.1, las cuales cuentan con la mayor cantidad de información histórica.

Tabla 5.1 Precipitación media anual y temperatura media anual en el municipio de Guanajuato.

Estación	Precipitación [mm/año]
Los Castillos	665.8
El Palote	593.3
La Calzada	715.7

Fuente: SMN.

5.1.6. Hidrografía

5.1.6.1. Subcuencas

En el municipio de León se tienen rasgos topográficos que propician la formación de diferentes microcuencas, que a su vez aportan a subcuencas; en la Tabla 5.2 se muestran las subcuencas que se encuentran en el municipio y en la Figura 5.8 puede observarse la distribución de éstas en el municipio.

[93] Salas, p. 39.
[94] www.e-local.gob.mx
[95] Promedio de las estaciones meteorológicas: Los Castillos, El Palote, La Calzada. Fuente: ERIC III. Servicio Meteorológico Nacional.

Tabla 5.2 Subcuencas hidrológicas en el municipio de León, Gto.

Subcuenca	% de la superficie municipal
Río Guanajuato	38.24
Río Turbio- P. Palote	55.46
R. Laja – Peñuelitas	6.22
Río de los Lagos	0.08

Fuente: INEGI

5.2. Problemática

5.2.1. Hidrología Urbana

La creciente urbanización e impermeabilización del terreno ha provocado un cambio en los regímenes de escurrimiento de agua de lluvia, mismos que en algunas zonas han provocado que, con el paso del tiempo, se hagan más frecuentes las inundaciones y encharcamientos en la zona urbana del municipio de León. Notándose esto en diversos puntos con más intensidad que en otros. En este apartado se mostrará una compilación de los puntos que son propensos a encharcarse.

5.2.1.1. Puntos conflictivos

Al hacerse más notorias las afectaciones debido a encharcamientos en algunas zonas de la zona urbana del municipio de León, las autoridades se dieron a la tarea de ubicar específicamente los sitios antes mencionados, ver Plano: Zonas de inundación. Dichos puntos fueron cartografiados como parte del desarrollo del Plan Hidráulico Municipal, a partir del cual se han derivado soluciones especificas para algunos casos. En la lista siguiente se muestran los puntos cartografiados[96].

La ubicación espacial de los puntos permitirá, como se discute más adelante, conocer si son aptos para la ubicación de un dispositivo de infiltración de agua, con base en los lineamientos y bibliografía presentados y discutidos anteriormente.

1 Zona Piel - Central Camionera: Blvd. Hilario Medina

2 Blvd. Hidalgo: Blvd. Hidalgo

3 Galería Las Torres: Calle Vasco de Quiroga

[96] En la lista original se encuentran los números salteados o repetidos. Se dejaron tal cual para evitar confusión al consultar el material original

4 Campo Curtidores: Blvd. Delta

5 Prol. Río Mayo y Crucifixión: Prolongación Río Mayo

6 Río Mayo y Crucifixión: Prolongación Río Mayo

7 Punto Verde: Blvd. Paseo de Jerez

8 Valle del Campestre: Colonia Valle del Campestre

9 Valle de Alborada: Fracc. Valle del Sol

10 Plaza del Campestre: Blvd. Clouthier

11 Los Naranjos: Libramiento Morelos

12 Ejido Nuevo León: Valle de San Bernardo

13 Ibero: Morelos y V. Valtierra

14 Deportivo Loyola: Blvd. La Luz

15 Eyupol: Colonia Eyupol

16 Orquídeas - Jerez: Colonia San Isidro

17 Maravillas: Colonia Maravillas

18 León 1: Libramiento Morelos Nte.

19 La Luz: Libramiento y Blvd. La Luz

20 Olímpica: Colonia Las Cruces

21 Delta - Jerez: Fracc. Delta de Jerez

22 Atotonilco: Valle de San Nicolás y Maguey

24 Jaborandi: Jardines de Jerez

25 Cementos: Colonia San José de Cementos

26 T. Lozano Margaritas: Paseo del Maurel y Margaritas

27 Conjunto Miguel Hidalgo: Colonia U. Hab. Miguel Hidalgo

28 T. Lozano Santa Rita: Colonia Valle de Alborada

29 T. Lozano La Piscina: Colonia Morelos

30 Rastro Municipal: Colonia Campo Verde y T. Landa

31 Pitayo: Colonia San Juan Bosco

32 Las Joyas: Colonia Centro Familiar La Piedad

33 Vado Transportistas: Colonia La esperanza

34 Santa Rita: Colonia Valle de Alborada

35 T. Landa - La Piscina: Blvd. Torres Landa Pte.

36 La Piscina: Beveda Zodiaco, Lomas de la Piscina

37 Los Olivos: Colonia Los Olivos

38 Chapalita: Colonia Chapalita

39 Blvd. Mariano Escobedo Andrade: Colonia Tepeyac

40 Blvd. Aeropuerto y Asís: Resid. El Cid sobre Av. Asís

41 Colina de San Isidro: Colonia Colinas de San Isidro

42 El Carmen: Residencial el Carmen

43 Brisas del Campo: Blvd. La Luz

44 Portones del Carmen: Prolongación la Luz

44 Portones del Carmen: Brisas de Campo Sobre La Luz

45 Torres Landa San Isidro: Glez. B. Negra Los Faisanes a San Pedro

45 T. Landa San Isidro: Glez. B. Negra San Isidro

46 Ciudad Industrial: Central de Abastos

47 Villa Magna: Quinta San Lorenzo y Villa Magna IV Sección

48 Echeveste: Cd. Aurora y Hdas. De Echeveste

49 Echeveste: Haciendas de Echeveste

50 Echeveste: Haciendas de Echeveste

51 Monte de Piedad: Miguel Alemán Zona Centro

52 Soledad: Miguel Alemán Zona Centro

53 Centro Eje: Blvd. Lopez Mateos Zona Centro

54 Parque Hidalgo: Parque Hidalgo

55 Gran Plaza: Colonia Peñitas

56 Pablo del Río: Colonia Los Paraísos

57 Colonia España: Colonia España

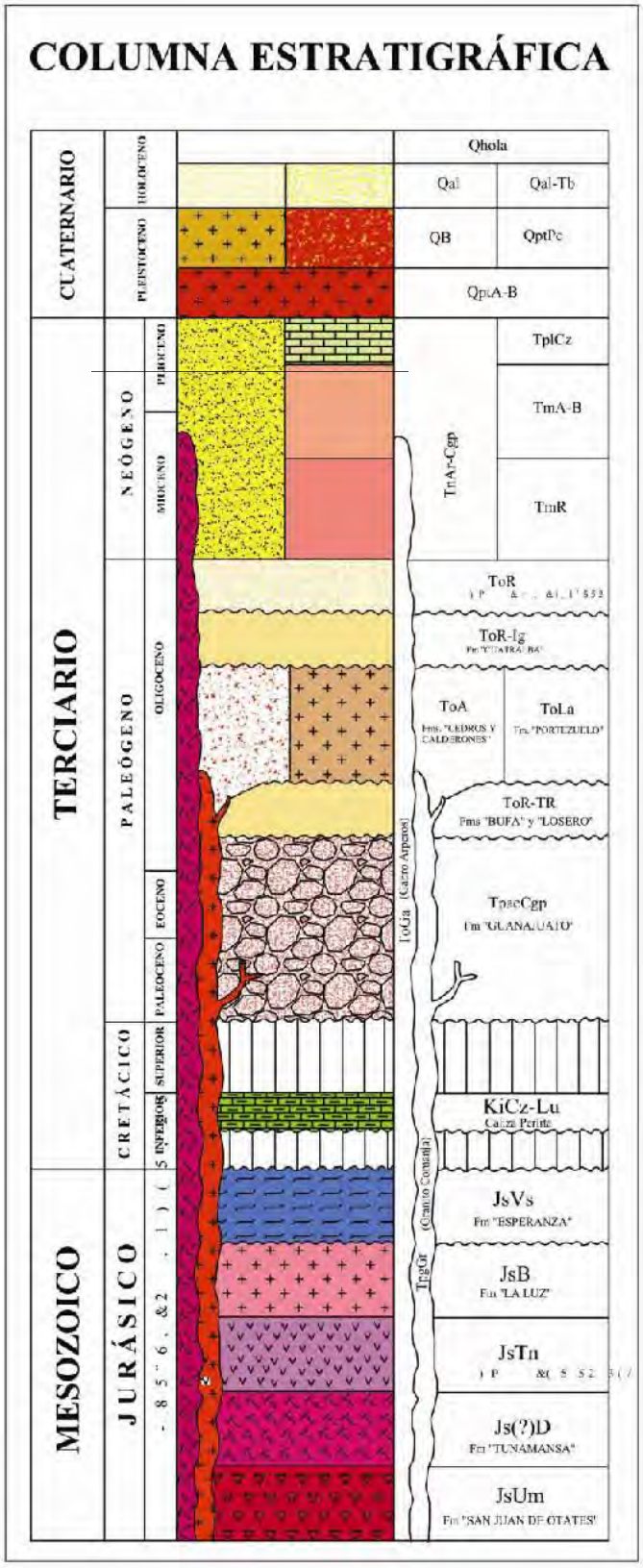
58 Piletas: Colonia San José Obrero

59 Universidad Cristiana: Arroyo el Granizo

59 Libramiento Morelos: Prado Hermoso

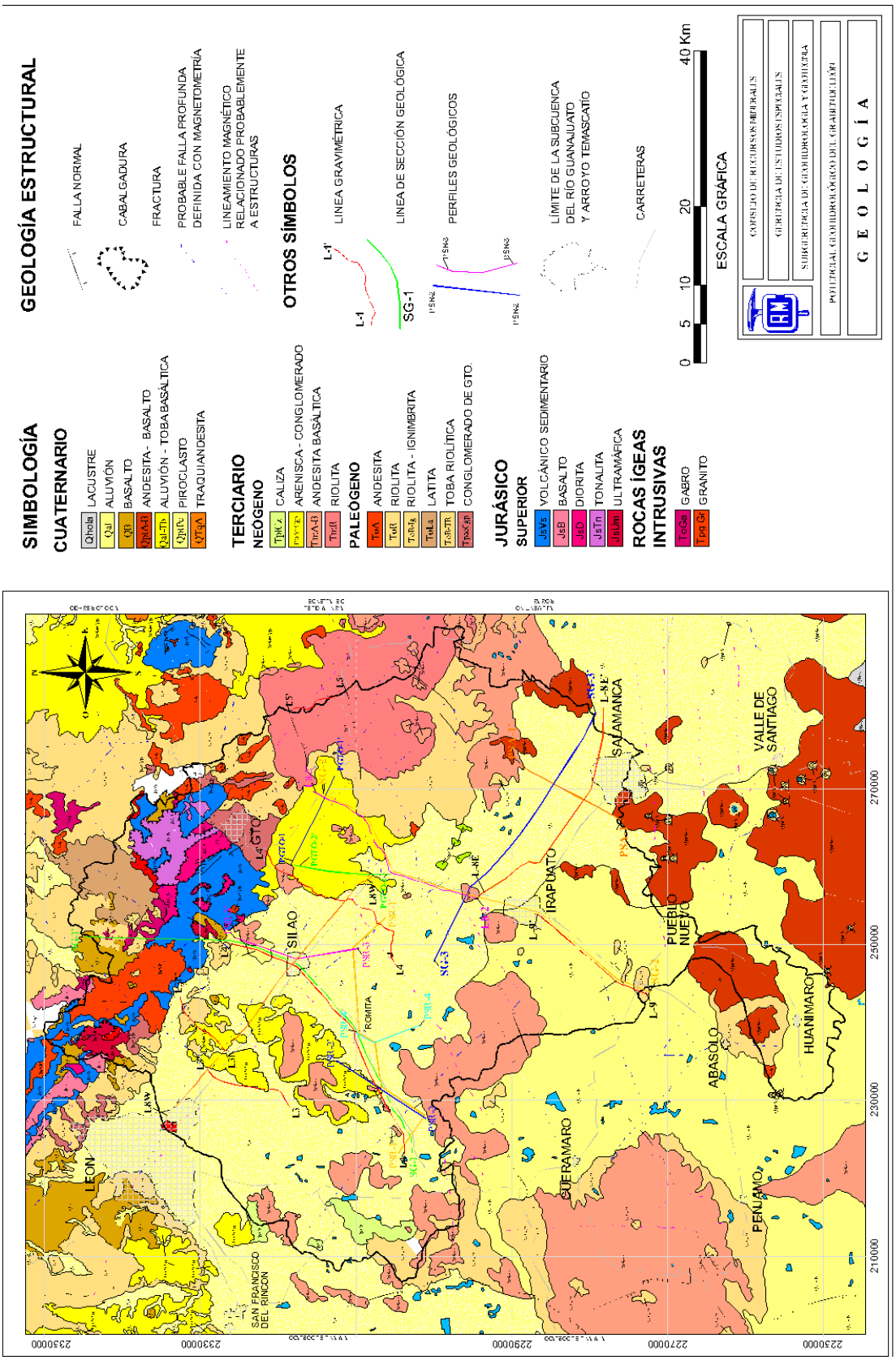
60 Soriana Maravillas: Libramiento Morelos

Figura 5.4 Columna estratigráfica de la zona.



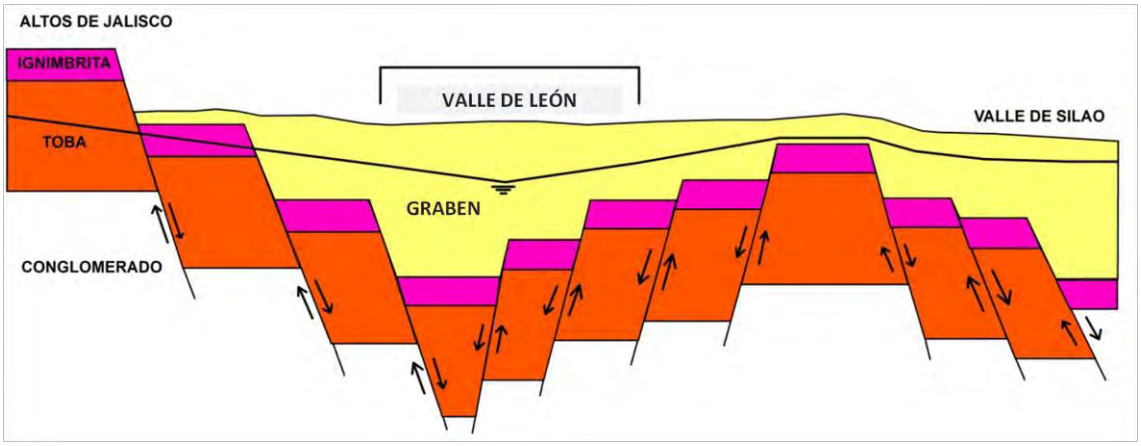
Fuente: COREMI, 2004

Figura 5.5 Mapa geológico de la zona.



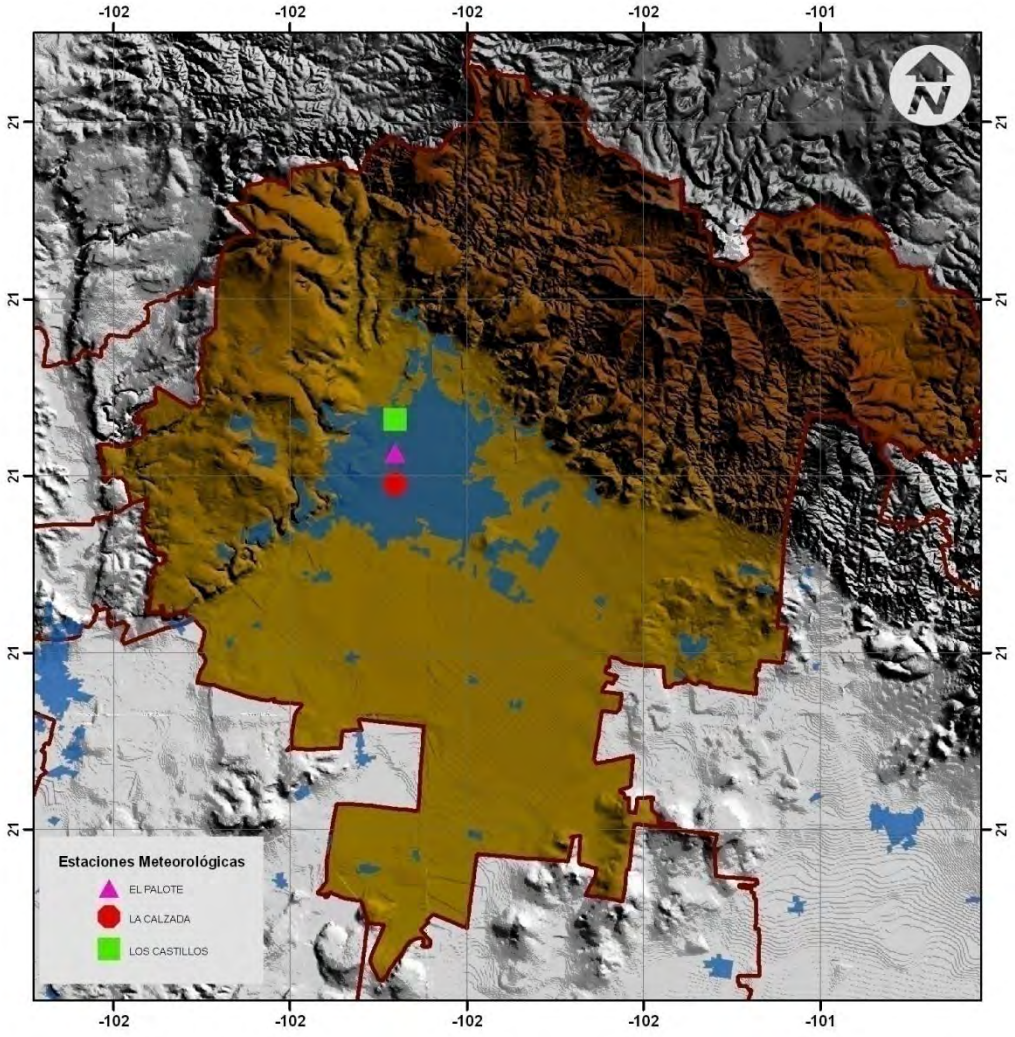
Fuente: COREMI, 2004

Figura 5.6 Esquema conceptual del acuífero de León.



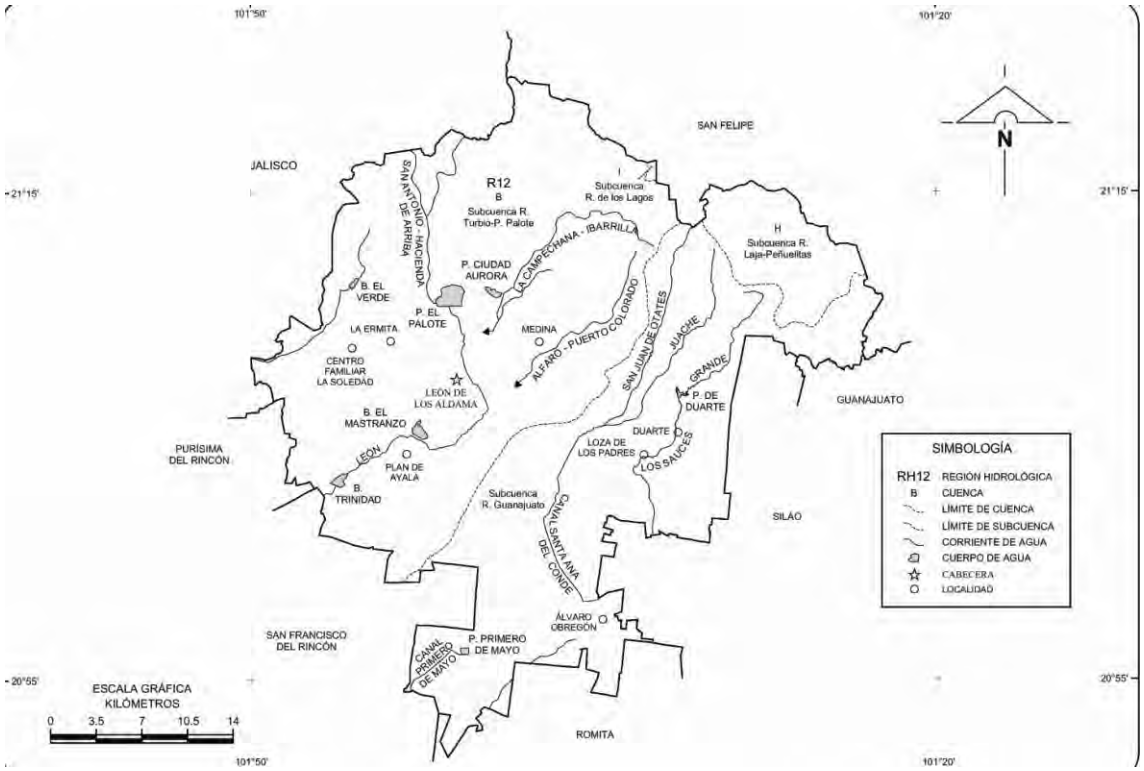
Fuente: SAPAL, 2007.

Figura 5.7 Estaciones meteorológicas en el municipio de León, Guanajuato.



Fuente: Elaboración propia con información de INEGI y ERIC III

Figura 5.8 Subcuencas hidrológicas en el municipio de León, Gto.



Fuente: INEGI.

6. Sitio propuesto

Quien nunca ha cometido un error nunca ha probado algo nuevo.

Albert Einstein

Para definir el lugar más apropiado donde se construirá un dispositivo de infiltración, se debe realizar un análisis de ubicación donde se incluyan aspectos como tipo de suelo, infraestructura adyacente, cercanía a pozos de extracción de agua subterránea, etc. Como se describió anteriormente.

A continuación se muestra el análisis de los criterios propuestos dentro de la metodología para la selección del sitio donde se llevará a cabo la obra de infiltración. La siguiente caracterización se hace para el sitio de encharcamiento # 8, ubicado en la Colonia Valle del Campestre.

6.1. Área disponible

Una de las restricciones principales para el desarrollo de infraestructura de este, tipo es la superficie disponible con que se cuenta para la construcción de la obra principal, así como de las obras complementarias para captación, si es que por diseño se requieren.

Con base en la información proporcionada por el SAPAL, se mapearon los puntos conflictivos en el programa Google Earth, de tal manera que con la ayuda de fotografías satelitales, fue posible determinar el área disponible en las cercanías de cada sitio. En la Figura 6.1 se muestra la zona de inundación # 8, donde se observa que se tiene un área verde en la cual sería posible construir una obra para infiltración de agua pluvial.

Además de contar con el área disponible, ésta zona es de fácil acceso, ya que se encuentra cerca de una vialidad importante, Blvd. Juan Alonso de Torres, y al estar en una calle paralela, la realización de obras no conflictuaría el tránsito en sus inmediaciones.

Este es el punto más importante, puesto que el tipo de suelo predominante en la zona es de tipo granular, por lo que se considera que la obra de recarga deberá ser de tipo superficial.

6.2. Cercanía a pozos de extracción

Con base en la información proporcionada por el SAPAL, se pudo saber que el pozo Ciudad 35 se ubica cerca de la zona propuesta. En la Figura 6.2 se muestra una zona de amortiguamiento de 30 metros para cumplir con esta condición de ubicación a una obra de infiltración.

Figura 6.1 Zona de inundación 8. Valle del Campestre: Colonia Valle del Campestre.

Elaborado con información de SAPAL y Google Earth.

Figura 6.2 Ubicación del pozo Cd. 35 con respecto y su área de amortiguamiento con respecto a la zona de inundación # 8.

Elaborado con información de SAPAL y Google Earth.

Por otro lado, la relativa cercanía de estas zonas a un pozo de extracción, brinda la oportunidad de conocer más acerca del medio circundante, ya que a

través de un sondeo eléctrico en el pozo # 35, se obtuvo información muy importante para la modelación del funcionamiento de un dispositivo de infiltración. O bien, en caso de contar con el perfil litológico del pozo, éste podría complementarse y corroborarse con la excavación de pozos a cielo abierto, o bien con la extracción de núcleos de suelo hasta una profundidad de 10 o 20 metros, en función del equipo y presupuesto disponibles.

6.3. Profundidad del nivel freático

Durante el recorrido de reconocimiento que se hizo en este sitio con personal del SAPAL, se informó que el nivel freático está a 30 metros de profundidad, con base en los registros que se tienen del pozo Ciudad 35.

6.4. Propuesta piloto

Con base en la disponibilidad de información se presenta la siguiente propuesta de una obra piloto para infiltración de agua pluvial.

6.4.1. Revisión geológica y estratigráfica

Como parte de la caracterización de los sitios propuestos para la ubicación de obras de infiltración, es necesario hacer una revisión geológico-estratigráfica en la vecindad de la obra. Para ello, se cuenta con información de cortes geológicos de pozos que ha elaborado la Comisión Estatal de Agua de Guanajuato (CEAG) como parte de su labor de administrador estatal del recurso. En la Figura 6.6 se muestra la ubicación de la zona propuesta y los pozos cercanos de los que se cuenta con información litoestratigráfica. A continuación se presentan las columnas estratigráficas de los pozos mostrados en la Figura 6.6.

Como se observa en la Figura 6.6, la zona propuesta se encuentra entre los pozos Ciudad 17 y Las Hilamas. Al realizarse la revisión de la información litológica entre estas dos secciones se determinan cuales son los estratos subyacentes a la zona de interés, y por tanto el tipo de suelo predominante. El contar con la columna litológica del pozo Ciudad 35 sería de mucha utilidad, ya que se tendría la certeza de los estratos inferiores al sitio propuesto en la vecindad inmediata.

Con base en las columnas litológicas de los pozos más cercanos a la zona de interés, en la Figura 6.9 se muestran los estratos en los primeros metros de ambos pozos. Debido a la ubicación de la zona con respecto a la geología superficial (ver Figura 6.10), se estima que el estrato más parecido será el del

pozo Cd. 17, encontrándose gravas en los primeros metros, correspondientes al relleno aluvial.

6.4.1.1. Geofísica

Como parte de la caracterización a detalle de las zonas potenciales, se recomienda ampliamente llevar a cabo una campaña de caracterización geofísica. La profundidad que deberán alcanzar los sondeos geofísicos tendrá poca profundidad, máximo 10-15 metros, en función de la profundidad que vaya a tener la obra de infiltración, considerando además el caso de obras que penetren a 5 metros, y que en los manuales revisados se propone una distancia mínima al nivel freático o estrato impermeable de 5 metros.

La técnica que se recomienda utilizar son los sondeos eléctricos verticales, ya que son de fácil implementación. En caso de tener la posibilidad de realizar una tomografía eléctrica para realizar cortes geofísicos, los resultados de éstos se complementarán y cruzarán con los resultados de los excavaciones de exploración que puedan realizarse en los sitios.

Para este proyecto, el SAPAL realizó sondeos geofísicos para caracterizar la zona de estudio. La interpretación de los resultados, a priori, mostró que se encontraría una zona de baja conductividad hidráulica, comunicado por el área de exploración de SAPAL. Sin embargo, los resultados de la prueba de infiltración, mostrados más adelante, se contraponen con lo obtenido por geofísica. Lo cual no quiere decir que los sondeos geofísicos hayan sido un fracaso, sino que servirán para correlacionar los tipos de suelo encontrados en el sondeo físico con el modelo geoeléctrico, teniendo así un modelo todavía más completo. En cuanto se cuente con la información resultado de los sondeos eléctricos, que proporcionará el SAPAL podrá llevarse a cabo dicha correlación.

6.4.2. Consideraciones

En la presente sección se describen las consideraciones que permitirán predimensionar un dispositivo de infiltración para la zona piloto propuesta.

6.4.2.1. Capacidad de infiltración

Como se mencionó anteriormente la capacidad de infiltración depende del tipo de suelo, se llevó a cabo una prueba de infiltración, tomando en cuenta las recomendaciones mostradas en la sección 3.2.1.1; se hicieron algunas modificaciones al modelo original propuesto para lograr una prueba lo más cercana a la realidad.

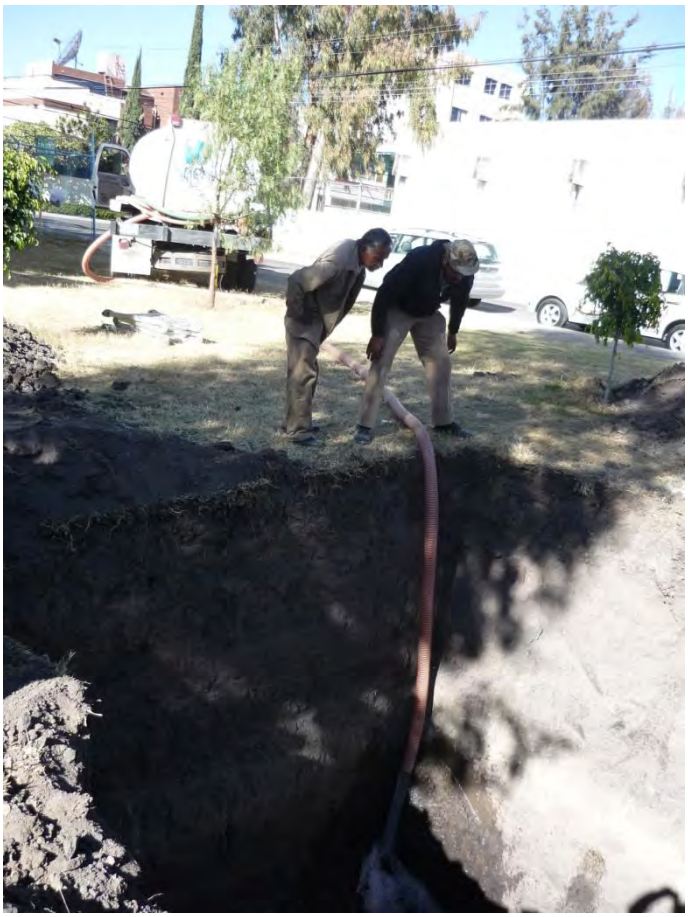
Día 1.

En el punto de encharcamiento Z-8, donde se encuentra un área verde se realizó una perforación cuadrangular con cuatro metros por lado y una profundidad también de 4 metros. Cabe destacar que no se consiguió tener una regularidad en el fondo y las paredes de la misma debido a que con la maquinaria utilizada no se logró obtener tal fineza en la excavación.

Antes de realizar la primera prueba de infiltración se llenó la fosa en el primer metro con el volumen de agua contenido en una pipa con capacidad de 10,000 litros, esto se realizó para saturar el medio adyacente a la fosa de tal manera que la prueba se apegase a las condiciones reales de funcionamiento. Se dejó que el agua se infiltrará para regresar al día siguiente y llevar a cabo la prueba.

Figura 6.3 Fosa para de prueba de infiltración (1)

Figura 6.4 Llenado de la fosa para de prueba de infiltración (2)



Día 2.

Para llevar a cabo la prueba se habilitó un flexómetro de 5 m de largo como escala de medición para el descenso del agua en la fosa.

Debido a la profundidad de la fosa no fue posible tener a una persona en la parte baja para llevar a cabo las lecturas, por lo que se hizo uso de binoculares para realizar las lecturas, con el debido error de paralaje en las mediciones, el cual fue constante, considerando así que no tuvo repercusiones al momento de estimar las velocidades de infiltración.

Para la primera prueba se llenó la fosa hasta un metro por encima del fondo y se llevaron a cabo las lecturas hasta que se tuvo una altura de 20 cm por encima del fondo. Inmediatamente se procedió a llenar de nuevo la fosa hasta el nivel de inicio de la prueba 1, para comenzar con la prueba 2. Esto mismo se repitió para la prueba # 3. En la Tabla 6.1 se muestran las lecturas de las pruebas realizadas.

Tabla 6.1 Resultados de la prueba de infiltración

Primera inundación		Segunda inundación		Tercera inundación	
Tiempo (min)	**Altura de agua (cm)**	**Tiempo (min)**	**Altura de agua (cm)**	**Tiempo min)**	**Altura de agua (cm)**
0	85	0	97.5	0	98
15	73.5	1	96	60	72
30	64.5	15	88	120	40
45	56	30	79	150	32
60	49	60	65	180	23
75	43.5	90	55		
90	37	120	44		
105	30	150	35		
120	25.5	180	26		
135	20				

Fuente: Elaboración propia

La capacidad de infiltración se calcula como la diferencia en el nivel en el intervalo de tiempo que se llevaron a cabo las mediciones.

$$C_i = \frac{\Delta \mathrm{h}}{\Delta \mathrm{t}}$$

En las siguientes Tablas se muestran los cálculos para estimar la capacidad de infiltración en cada prueba.

Tabla 6.2 Resultados de la primera prueba de infiltración

Primera inundacion						
Tiempo (min)	N.D. (cm)	Dt (min)	Dh(cm)	Dh/Dt (cm/min)	Dh/Dt (m/h)	Dh/Dt (m/día)
0	85	15	11.5	0.77	0.46	11.04
15	73.5	15	9	0.60	0.36	8.64
30	64.5	15	8.5	0.57	0.34	8.16
45	56	15	7	0.47	0.28	6.72
60	49	15	5.5	0.37	0.22	5.28
75	43.5	15	6.5	0.43	0.26	6.24
90	37	15	7	0.47	0.28	6.72
105	30	15	4.5	0.30	0.18	4.32
120	25.5	15	5.5	0.37	0.22	5.28
135	20					

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6.3 Resultados de la primera prueba de infiltración

Segunda inundación						
Tiempo (min)	N.D. (cm)	Dt (min)	Dh(cm)	Dh/Dt (cm/min)	Dh/Dt (m/h)	Dh/Dt (m/día)
0	97.5	1	1.5	1.50	0.90	21.60
1	96	14	8	0.57	0.34	8.23
15	88	15	9	0.60	0.36	8.64
30	79	30	14	0.46	0.28	6.72
60	65	30	10	0.33	0.20	4.80
90	55	30	11	0.367	0.22	5.28
120	44	30	9	0.30	0.18	4.32
150	35	30	9	0.30	0.18	4.32
180	26					

Fuente: Elaboración propia

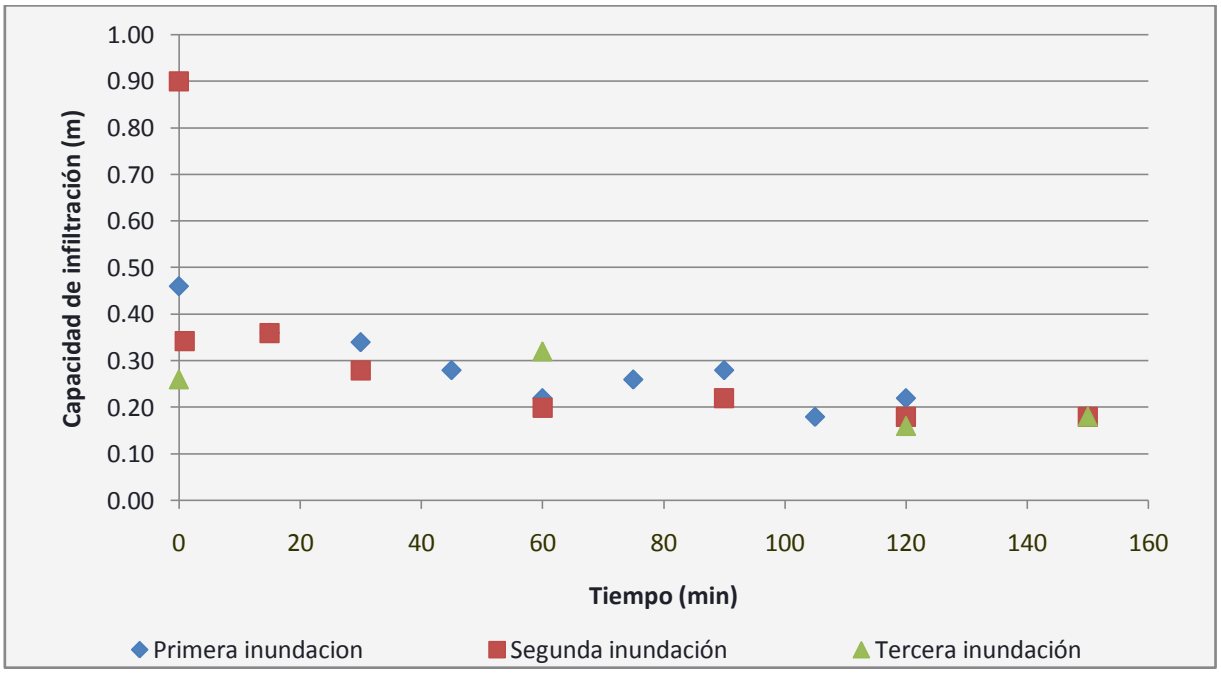
Tabla 6.4 Resultados de la primera prueba de infiltración

Tercera inundación						
Tiempo (min)	N.D. (cm)	Dt (min)	Dh(cm)	Dh/Dt (cm/min)	Dh/Dt (m/h)	Dh/Dt (m/día)
0	98	60	26	0.43	0.26	6.24
60	72	60	32	0.53	0.32	7.68
120	40	30	8	0.27	0.16	3.84
150	32	30	9	0.30	0.18	4.32
180	23					

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran graficados los resultados de la capacidad de infiltración para cada prueba.

Figura 6.5 Capacidad de infiltración vs tiempo (Duración de la prueba)



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se observa que los resultados de la primera prueba se encuentran ligeramente por encima de los obtenidos para las pruebas 2 y 3, esto debiéndose probablemente a que en las últimas pruebas el medio se encuentra con una mayor cantidad de agua, de tal manera que las condiciones de funcionamiento se aproximan más a las de operación bajo un evento de precipitación. Para fines de cálculo se utilizarán los resultados de las pruebas 2 y 3, una vez que se hacen constantes (C≈0.18 m/h).

6.4.2.1.1. Descripción del suelo encontrado

En la fosa de prueba pudo observarse que el suelo en la primera capa tiene un relleno de materia orgánica con altos contenidos de arcilla, que le hacen impermeable en el primer metro. Una vez que se profundiza comienza a encontrarse una intercalación de arcillas y gravas con contenidos de arenas y arcillas. En el estrato suprayacente al fondo de la excavación se hallaron nuevamente gravas con una matriz areno-arcillosa.

6.4.2.1.2. Conclusiones de la prueba de infiltración

Para una mayor confiabilidad de los resultados, se propone llevar a cabo la prueba durante un mayor periodo de tiempo, 1 semana arrojaría resultados más apegados a las condiciones reales de operación.

En las siguientes pruebas se propone realizar un ensayo combinado de carga variable (CV) sobre el fondo de la fosa y de carga constante (CC), para observar cuánto impacta esto en la capacidad de infiltración y si es posible tomar como válidos los resultados da la prueba con CV.

La capacidad de infiltración hallada es la mínima que se encontrará puesto que las últimas mediciones se realizaron con la menor carga hidráulica sobre el fondo de la fosa.

El promedio obtenido en el experimento es de 4.3 m/día, muy superior al promedio mostrado en la Tabla 4.1. Al tener una capacidad de infiltración tan alta, el suelo se hace sensible a la colmatación. Así que se deberá tener especial cuidado con la incorporación de partículas a las trincheras. Para ello deberán tenerse filtros de grava y arena, los cuales puedan ser removidos y/o limpiados.

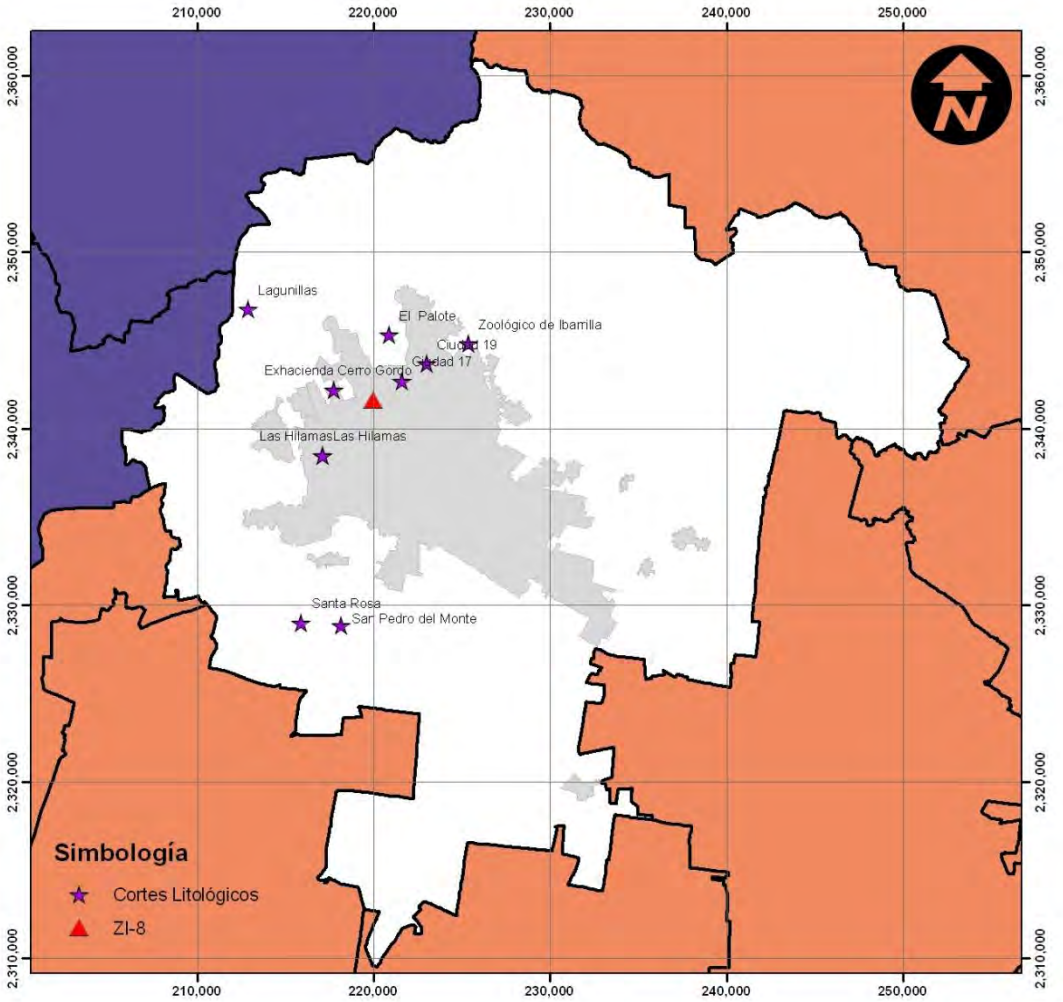
Para elegir la capacidad de infiltración que sirva como parámetro de diseño deberá tomarse en cuenta el efecto de reducción por saturación del suelo y que el agua que se infiltrará será de una calidad diferente a la utilizada para la prueba. Por lo tanto, la capacidad de diseño utilizada se reducirá en un 30%, previendo este tipo de situaciones. Tenido que la capacidad de infiltración de diseño será la siguiente

$$C = 0.126 \text{ m/h.} = 3.024 \text{ m/día}$$

6.4.2.2. Evento de diseño

Para el sitio de estudio, con base en la Tabla 4.3, para zonas de viviendas unifamiliares, se propone un período de retorno de 1.5 años, y una tormenta típica de duración de 60 minutos como evento de diseño. Con base en ésta información y la ecuación IDF estimada para el municipio, se tendrá una intensidad de precipitación de 27.63 mm/h.

Figura 6.6 Ubicación de los sitios propuestos y de los pozos con información litoestratigráfica.

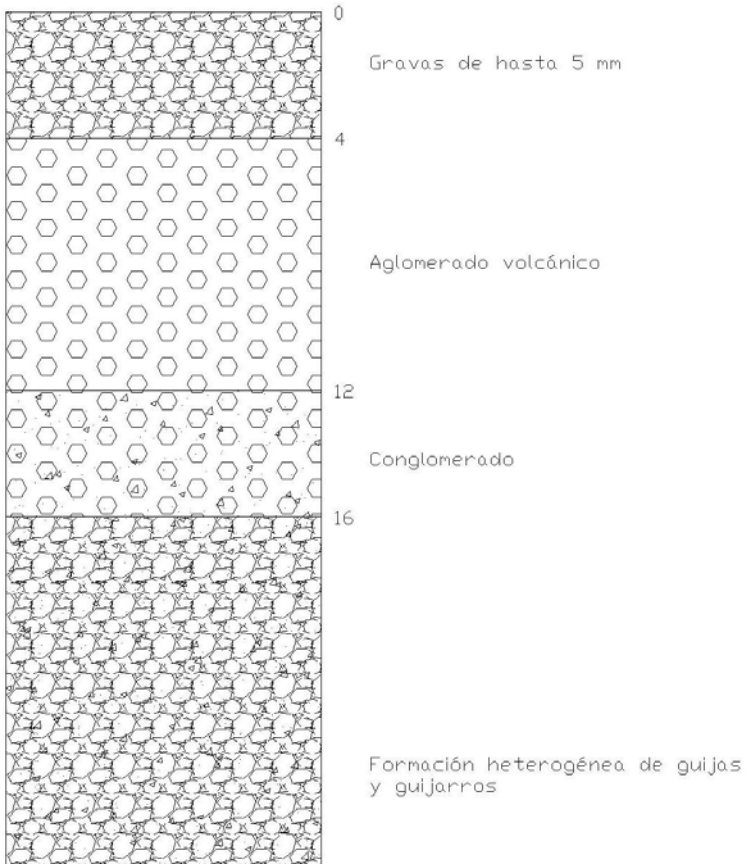


Elaborado con información de INEGI y CEAG

Figura 6.7 Corte litológico del pozo Las Hilamas. Cortesía CEAG.

Fuente: CEAG

Figura 6.8 Estratos más superficiales del corte litológico del pozo Ciudad 17.



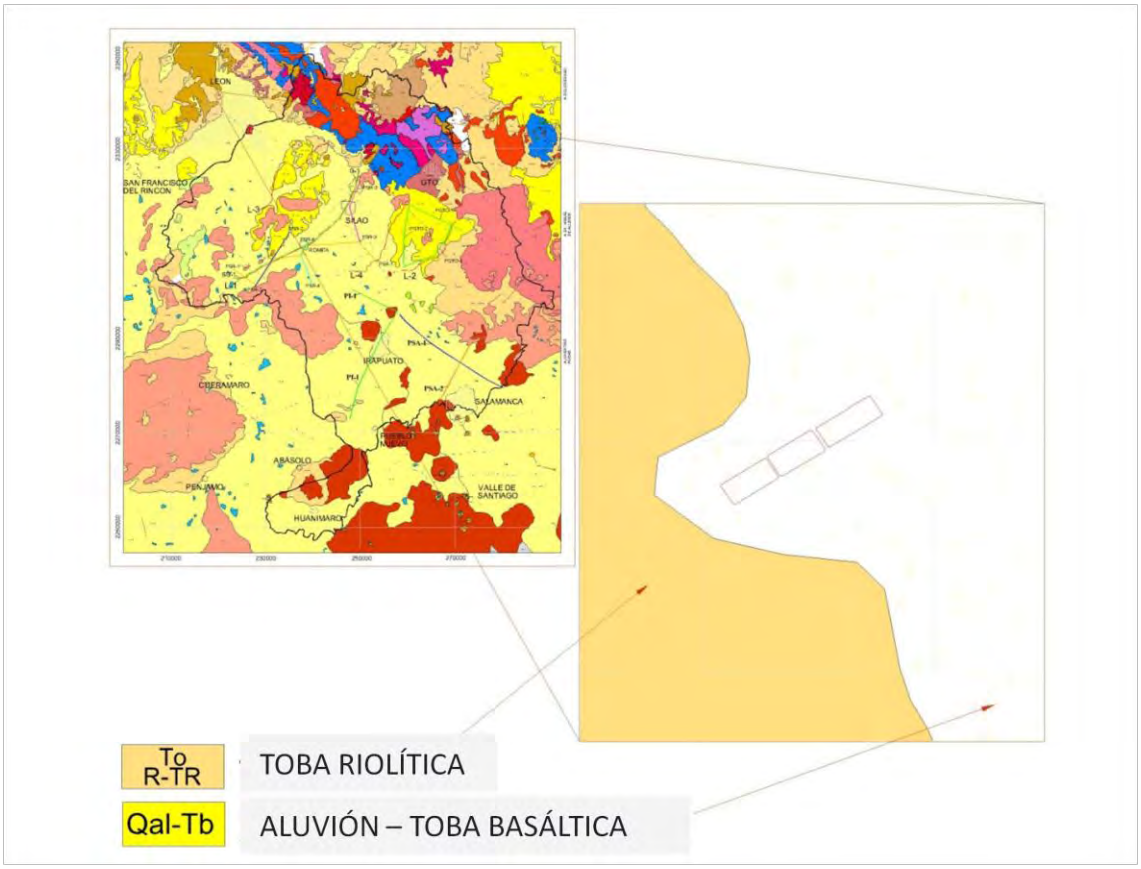
Fuente: SAPAL.

Figura 6.9 Estratos en los primeros metros de los pozos Las Hilamas y Cd. 17.

Profundidad (m)	Pozo Las Hilamas	Pozo Ciudad 17
0	Basalto Alterado con Frag. De Toba	Gravas de hasta 5 mm
1		
2		
3	Basalto	
4		
5		Aglomerado volcánico
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		Conglomerado
14		
15		

Elaborado con información de SAPAL.

Figura 6.10 Sobreposición de la zona de interés con la geología superficial.



Elaborado con información de COREMI y SAPAL.

6.4.2.3. Zona de aportación

Se dimensionará inicialmente una obra, que permita infiltrar el agua que precipita sobre la superficie correspondiente a las dos áreas verdes, presentes en la zona de inundación # 8. Una vez construida esta obra, con base en su funcionamiento, de ser favorable, se propondrán las modificaciones necesarias en la zona para que se amplíe la superficie de aportación.

6.4.2.3.1. Captación y conducción

Para captar el agua pluvial se propone la construcción de canaletas con recubrimiento de concreto a los lados de las áreas verdes, que también servirán para conducir el agua hacia la zona de infiltración.

Las dimensiones del canal, estarán dadas para conducir el gasto pico generado en las zonas de análisis. En este caso se diseñará el canal que drenará el área

donde no se tiene la obra de infiltración, y para la otra área verde se utilizará el mismo diseño tipo.

El canal debe conducir el gasto pico generado en dicha sección, con un área de 12,012 m^2. Para ello se utilizará la fórmula racional para determinar el gasto pico con base en los datos propuestos. Se propone un coeficiente de escurrimiento de 0.2 para áreas de juegos o áreas verdes[97] y la intensidad de precipitación 27.63 mm/h.

Con dicha información se tiene que:

$$Q = 2.778CiA$$

$$Q = 2.778 * 0.2 * 27.63 \left(\frac{mm}{h}\right) * 12.012\ (ha)$$

$$Q = 18.44\ lps$$

Figura 6.11 Zona de aportación. Fuente: Elaboración propia con información de SAPAL y Google Earth.

Elaborado con información de Google Earth

[97] Aparicio, p. 210

Se propone un canal trapecial con taludes 3:1, con una base de 0.3 metros y una pendiente longitudinal de 1 milésima, n = 0.013 para concreto. Mediante la utilización de la ecuación de Manning para escurrimientos a superficie libre se determinan las dimensiones para que el canal conduzca el flujo estimado.

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2}$$

Con la ecuación de continuidad se tiene que:

$$Q = vA$$

El área de la sección de conducción del canal se estima con base en la siguiente relación:

$$A_T = b * h + 2 * \frac{kh * h}{2}$$

Se propone una altura de agua de 5 cm, y se tiene que la capacidad del canal es de 32.6 lps. Con éste tirante de agua se tiene garantizado que se podrá conducir el caudal de diseño. El canal deberá contar con una sobreelevación de 10 cm, para un total de 15 cm de altura. El ancho exterior del canal está dado por:

$$W = b + 2kh$$

$$W = 0.3 * 2 * 3 * 0.15$$

$$W = 1.2\, m$$

6.4.3. Dimensionamiento

6.4.3.1. Propuesta y dimensionamiento de la obra de infiltración

Como obra de infiltración se propone la utilización de una trinchera rellena de grava limpia, que con una porosidad estimada de 30% proporcionará el almacenamiento para posteriormente infiltrar de manera constante el agua pluvial hacia el subsuelo.

La superficie de captación está dada por las dos áreas verdes, teniéndose una superficie total aproximada[98] de 23, 5262 m^2. Con base en la intensidad, duración del evento de diseño y la superficie de captación se estima el volumen a captar de la siguiente manera:

[98] Estimado con base en el plano con la delimitación de manzanas de la zona urbana de León. Fuente: SAPAL.

$$V = \frac{i * d * S}{1000}$$

Donde

V – volumen precipitado, en m^3.

i – intensidad de precipitación, mm/h.

d – duración del evento, horas.

S – superficie de captación, m^2.

$$V = \frac{27.63\ \left(\frac{mm}{h}\right) * 1.0\ (h) * 23{,}526\ (m^2).}{1000}$$

$$V = \ 650\ m^3$$

Por otro lado el volumen útil de la obra de infiltración está dado por la siguiente relación:

$$V_{útil} = A * H * St$$

Dónde:

A – área de la base de la obra de infiltración,en m^2

H – altura útil, en m.

St – porosidad del material de relleno, adimensional.

Tomando en cuenta que se utilizará grava limpia como material de relleno, la cual tiene una porosidad aproximada de 0.3 y que las dimensiones propuestas para la trinchera son 50 metros de largo por 30 de ancho, e igualando el volumen de la obra de infiltración al volumen captado, se tiene que:

$$H = \frac{V_{útil}}{A * S}$$

$$H = \frac{650\ m^3}{1{,}500\ m^2 * 0.3}$$

$$H = \ 1.44\ m$$

El cual se redondeará a 1.50 metros de altura útil. Se tomará en consideración la necesidad de utilizar una sobreelevación o bordo libre de 1.00 metros, debido a que la conducción hacia la obra implica un escurrimiento a superficie

libre, y el cruce por una vialidad, por lo que tendrá que bajarse el nivel de este canal para permitir el libre paso de vehículos. Siendo la profundidad total de la obra 2.50 metros. En los planos anexos, se muestran la situación actual del parque, la propuesta para la trinchera de infiltración, la canaleta de conducción y los volúmenes de obra estimados con base en los mismos planos.

6.4.4. Caudal de infiltración

Con base en los resultados de la prueba de infiltración, y el área del fondo de la obra de infiltración, es posible estimar el caudal que infiltrará la obra.

$$Q = Ci * A$$

Donde

Q – caudal en m^3/día.

Ci - capacidad de infiltración, m/día.

A – área del fondo de la trinchera de infiltración, m^2.

$$Q = Ci * A$$

$$Q = 3.024 \left[\frac{m}{d}\right] * 1{,}500 \ [m^2]$$

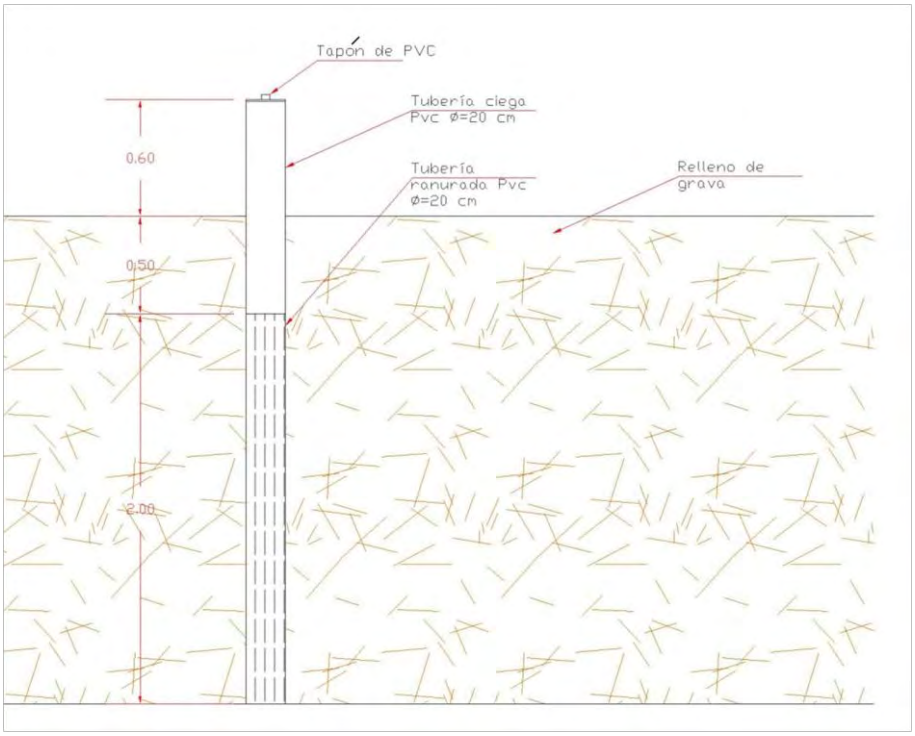
$$Q = 4{,}536 \left[\frac{m^3}{día}\right] = 52.5 \ [lps]$$

6.4.5. Monitoreo y etapa de prueba

Para verificar el funcionamiento de la obra de infiltración será necesario monitorearla durante un período de tiempo razonable que permita colectar la información suficiente para determinar las verdaderas condiciones de operación. Como período de prueba se propone un lapso de dos años (dos temporadas de lluvia).

En este periodo se llevará a cabo el monitoreo de los tiempos de vaciado del dispositivo en función de la lámina de precipitación que se presente en la zona, para lo cual será necesaria la instalación de un pozo de observación al interior de la obra de infiltración, que permita medir los descensos en el nivel del agua y también la toma de muestras para análisis de calidad del agua, resultados que servirán para diseño y dimensionamiento de obras similares en otras zonas de la ciudad. En la Figura 6.12 se muestran las características y dimensiones que deberá tener el pozo mencionado al interior de la obra.

Figura 6.12 Esquema del pozo de observación al interior de la obra de infiltración.



Elaboración propia

Para la medición de las láminas de precipitación en la zona de estudio, se propone la instalación de una estación climatológica, que cuente con un pluviógrafo de tal manera que sea posible obtener las intensidades de precipitación de cada evento.

6.5. Mantenimiento

Para que una obra cumpla su cometido, no sólo es importante realizar un diseño constructivo adecuado, sino también llevar a cabo obras para mantener sus condiciones de operación lo más cercano a las deseadas por aquel que proyectó dicha obra. Así, los sistemas no pierden eficiencia y continúan cumpliendo con su cometido para beneficio de los usuarios de éstos

En el caso del sistema de infiltración en trinchera que se propone, deberá tomarse en cuenta que la lluvia usualmente arrastra sedimentos y que estos pueden colmatar el medio granular que sirve de relleno. En este caso es mejor que se colmate el relleno de la trinchera y no el suelo.

Podrían tomarse varías medidas para aumentar la vida útil de la obra.

1. Se propone la instalación de piezómetros al interior de la trinchera para el monitoreo de calidad de agua y verificar cómo avanza el flujo al

interior de la trinchera. Esto permitirá saber si existe un taponamiento considerable en el sistema y ubicar los tramos donde se requieren llevar a cabo las obras de mantenimiento.

2. Considerando que la distribución del agua en la trinchera se hace con un sistema de tuberías perforadas, se recomienda que la arena de menor calibre sea la que rodea dichas tuberías y tenga una posición lo más superficial posible. De tal manera, en caso extremo será posible retirarla y sustituirla por arena limpia que regenere las condiciones operativas de la trinchera.
3. Una obra de mantenimiento puede llevarse a cabo mediante la inyección de agua en uno de los piezómetros y su extracción en otro, simulando un sistema dipolo. Así en el piezómetro donde se realice la extracción se estarán capturando materiales finos, de tal manera que esto permitirá la regeneración del sistema.

No se incluye un costo por las obras de mantenimiento, puesto que este podrá variar sensiblemente por ejemplo si solo se requiere sustituir una porción de relleno de un par de metros cuadrados, a si se tiene que sustituir algo equivalente a un cuarto del total. Ya que esto está relacionado con movimiento de tierras y es uno de los conceptos más costosos en obras de ingeniería. De igual manera si es necesario bombear agua, deberá considerarse el uso de un generador, dos bombas y el tiempo que se tenga que tener encendido el sistema, porque bien pueden ser un par de horas a trabajar 48 horas seguidas. Y así se pueden tener más ejemplos de variación, por lo que se recomienda ampliamente al personal que de seguimiento, valore cuidadosamente cuáles serán las obras de mantenimiento a realizar.

6.6. Catálogo de conceptos

Para la construcción de cualquier obra civil y conocer si es realmente un proyecto viable, debe elaborarse un anteproyecto que incluya una componente de costos. En éste caso, en los puntos anteriores se presentó la parte técnica del anteproyecto y en éste apartado se muestran la parte referente al costo de la obra en sí como de las obras inducidas que se deben realizar para que el proyecto se lleve a buen término. A continuación se presentan los conceptos más generales de la obra. Cabe destacar que tras la realización del proyecto ejecutivo de la obra se ahondará más en los conceptos y los costos deberán ser aquellos que apruebe el SAPAL con base en su tabulador general.

CLAVE	CONCEPTO	UNIDAD	CANTIDAD	P.U.	IMPORTE
PRELIMINARES					$241,625.30
PRE-01	Trazo y nivelación topográfico del área; el Precio Unitario (P.U.) incluye: coordenadas UTM, trazo de referencias y ejes, nivelación hasta un banco de nivel oficial, marcado de palomas así como de vértices y cadenamientos a no más de 20 m, crucetas, mojoneras, herramientas, equipo y mano de obra especializada.	m²	1,749.00	$3.35	$5,859.15
PRE-02	Delimitación del área de trabajo mediante cinta de protección amarilla reflejante con soportes rígidos a cada 3 m con leyenda de "Peligro"; el P.U. incluye: suministro de materiales, cargas, descargas, acarreos, colocación de cinta a dos alturas, a 50 cm del suelo y a 1.5 m del suelo, elementos rígidos, herramientas y mano de obra.	m	176	$6.20	$1,091.20
PRE-03	Iluminación nocturna de zanjas mediante una instalación de alumbrado hecho a base de focos de 100 Watts cubiertos por cubetas rojas; el P.U. incluye: suministro de materiales, cargas, descargas, acarreos, cable uso rudo de 3x10 American Wire Gauge (AWG), conexiones, empalmes, cortes, desperdicios, fijación, energización, herramienta y mano de obra.	Jornada (Jor)	30	$103.49	$3,104.70
PRE-04	Generador de energía eléctrica para iluminación nocturna de 300 Kw; el P.U. incluye: renta del equipo de acuerdo a la demanda de energía eléctrica del proyecto, combustible, resguardo, tablero general de distribución con un interruptor termomagnético general y otro para el circuito de iluminación, conexiones, herramientas, mano de obra.	Pza.	1	$30,000.00	$30,000.00
PRE-05	Bodega provisional para resguardo de materiales y equipo hecha a base de estructura metálica y lámina acanalada; el P.U. incluye: suministro de materiales, velador, cargas, herramientas, instalación eléctrica para iluminación, herramientas, mano de obra.	Pza.	1	$45,860.95	$45,860.95

PRE-06	Renta de baños portátiles; el P.U. incluye: flete, cargas, descargas, acarreos, colocación, limpieza diaria, herramientas, mano de obra.	Jor	30	$568.95	$17,068.50
PRE-07	Despalme por medios mecánicos hasta una profundidad de 60 cm; el P.U. incluye: equipo, apile temporal de escombro, traspaleo, escarificado, herramienta y mano de obra.	m²	1,749.00	$59.20	$103,540.80
PRE-08	Retiro de árboles existentes; el P.U. incluye: equipo de corte, maniobras de tala, señalización del área circundante, riesgos, encostalado de desperdicios, carga y retiro de material producto de la tala, herramientas, escaleras, mano de obra.	Pza	18	$1,950.00	$35,100.00
OBRA CIVIL					**$2,798,116.84**
OC-01	Excavación por medios mecánicos hasta una profundidad de 3.00 m en terreno tipo B; el P.U. incluye: equipo, traspaleo, escarificado, acarreo de material producto de excavación a primera estación a no más de 50 m, herramientas, mano de obra.	m³	3,750.00	$75.74	$284,025.00
OC-02	Retiro de material producto de excavación; el P.U. incluye: acarreos, cargas, descargas, abundamiento del material hasta un 20%, tiro libre, herramientas y mano de obra.	m³	4,500.00	$250.00	$1,125,000.00
OC-03	Canal de concreto hidráulico f'c = 200 Kg/cm², con una sección trapecial de 1.20 m en la corona, 0.30 m en la base y 0.15 m de altura; con un espesor de pared de 5 cm y hombro de 50 cm de largo de cada lado; el P.U. incluye: suministro de materiales, flete, cargas, acarreos, nivelación, acabado pulido, malla electrosoldada 6x6 10/10, varillas del #4 a cada 2 m a tresbolillo a forma de anclaje con una longitud de desarrollo de 30 cm, pendiente integral de 1/1000, herramienta, mano de obra.	m	322.00	$434.07	$139,770.54
OC-04	Relleno a volteo con grava controlada de 3/4"; el P.U. incluye: suministro, cargas, descargas, acarreos, nivelación, herramientas y mano de obra.	m³	3,750.00	$315.20	$1,182,000.00

OC-05	Pozo de visita de mampostería con un diámetro de 1.20 m y una profundidad interior de 2 m; el P.U. incluye: suministro de materiales, cargas, descargas, acarreos, plomo, aplanado interior con mortero cemento-arena 1:4, plomo, preparaciones para entrada y salida del agua por la parte superior, escalera marina hecha a base de varilla del #3, tapa y brocal de concreto, equipo, herramientas, mano de obra.	Pza	1.00	$5,680.52	$5,680.52
OC-06	Ranurado en concreto asfáltico de 12 cm de espesor; el P.U. incluye: equipo de corte con disco de punta de diamante, señalización del área, trabajos nocturnos, reflectores eléctricos, trazo, herramienta y mano de obra.	m	14.00	$110.00	$1,540.00
OC-07	Demolición de concreto asfáltico de 12 cm de espesor; el P.U. incluye: trabajos nocturnos, encostalado de material producto de demolición, retiro a tiro libre, reflectores eléctricos, corte a 45° en los extremos para unión con nueva estructura, sello a base de lechada de cemento en los extremos, traspaleo, cargas, equipo, herramientas, mano de obra.	m²	2.10	$65.25	$137.03
OC-08	Rejilla tipo Irving IS-05 de 1 1/2" x 3/16" para tráfico pesado dentada; el P.U. incluye: suministro de materiales, cortes, desperdicios, marco y contramarco de Ángulo LI de 1 3/4" x 3/16", patas de gallo de varilla del #3, sección de marcos de 1.2x0.60 m, nivelación, equipo de oxígeno y acetileno, puntos de soldadura en extremos para asegurar fijación, equipo, herramientas y mano de obra.	m²	17.50	$3,426.50	$59,963.75
INSTALACION HIDRAULICA					**$184,839.81**
IH-01	Tubería de PVC cédula 80 de 30 cm de diámetro; el P.U. incluye: suministro, cargas, descargas, cortes, desperdicios, tendido, misceláneos de fijación, pruebas de hermeticidad, herramientas, mano de obra.	m	276.00	$605.31	$167,065.56

IH-02	Tubería de PVC cédula 80 de 20 cm de diámetro; el P.U. incluye: suministro, cargas, descargas, cortes, desperdicios, tendido, misceláneos de fijación, pruebas de hermeticidad, herramientas, mano de obra.	m	12.50	$402.20	$5,027.50
IH-03	Tee de PVC de 30 cm de diámetro cédula 80; el P.U. incluye: suministro, cargas, descargas, misceláneos de fijación, pruebas de hermeticidad, herramientas, mano de obra.	Pza.	8.00	$868.50	$6,948.00
IH-04	Tee de PVC de 20 cm de diámetro cédula 80; el P.U. incluye: suministro, cargas, descargas, misceláneos de fijación, pruebas de hermeticidad, herramientas, mano de obra.	Pza.	5.00	$723.75	$3,618.75
IH-05	Tapón capa de PVC de 20 cm de diámetro cédula 80; el P.U. incluye: suministro, cargas, descargas, misceláneos de fijación, pruebas de hermeticidad, herramientas, mano de obra.	Pza.	4.00	$545.00	$2,180.00
COMPLEMENTARIOS					**$20,988.00**
C-01	Limpieza del área de trabajo al finalizar los trabajos; el P.U. incluye: materiales, encostalado de basura, tiro libre, herramientas y mano de obra.	m²	1,749.00	$12.00	$20,988.00
				SUBTOTAL =	**$3,245,569.95**
				IVA DEL 16 % =	**$519,291.19**
				IMPORTE TOTAL =	**$3,764,861.14**

7. Conclusiones y recomendaciones

No entiendes realmente algo a menos que seas capaz de explicárselo a tu abuela.

Albert Einstein

En la presente tesis se propuso una metodología para la implementación de obras de infiltración de agua pluvial para manejo de inundaciones y encharcamientos en zonas urbanas. Los pasos presentados no son ni por mucho definitivos y absolutos. Simplemente se pretende sentar un precedente para este tipo de proyectos y que se tome como una guía útil, susceptible de muchas mejoras.

Finalmente, se ubicó un lugar que, con los criterios propuestos, es apto para albergar una obra de infiltración.

Así mismo, siguiendo la normatividad vigente se dimensionó una obra piloto para infiltrar agua de lluvia en el lugar seleccionado, adecuado a las características del medio, precipitación y capacidad de infiltración del suelo.

En cuanto a la obra piloto, cabe destacar que serán necesarias varias actividades para ajustar el anteproyecto presentado y convertirlo en un proyecto ejecutivo construible y operable de manera eficiente. Dentro de dichas actividades se encuentra lo siguiente:

- Realizar un levantamiento topográfico a detalle para verificar los sentidos de escurrimiento y poder generar las cantidades de obra.
- Llevar a cabo un transecto, para determinar si en el área verde seleccionada se encuentra alguna especie arbórea, que sea necesario trasplantar o en dado caso dejar intacta.
- Verificar la calidad del agua que se infiltra, para determinar cuáles son las obras complementarias requeridas para prevenir el ingreso de contaminantes al sistema acuífero.
- Determinar con el modelo digital de elevación y sistema de microcuencas, cuál es el área de aportación real que drenaría hacia el dispositivo y verificar cuál es el caudal de operación para el cual estaría funcionando, como si de una obra de alcantarillado tradicional se tratase.
- Verificar el nivel piezométrico en la zona de estudio mediante piezómetros o por medio de un sondeo en el pozo más cercano.
- Reelaborar el catálogo de conceptos con base en el transecto, el levantamiento topográfico.
- Elaborar un diagrama de flujo de la obra donde se muestren las actividades que se llevarán a cabo durante la obra y la etapa de prueba.
- Programa de difusión de la obra entre la población beneficiada para su cuidado y preservación.

Para aumentar la vida útil de las obras, deberá recordarse que todas ellas requieren de un mantenimiento preventivo y correctivo, de tal forma que sigan prestando la función para la cual fueron diseñadas. Esto es muy importante, ya que después que se observa que una obra deja de cumplir con su cometido, usualmente se abandona sin tomarse el tiempo para verificar cuáles son las medidas requeridas para volverla funcional. Se recomienda encarecidamente que se evalúen las distintas opciones para llevar a cabo el mantenimiento de una obra de este tipo, para que se use la más económica (mejor resultado, con un costo adecuado).

De igual manera, es muy importante llevar a cabo acciones de monitoreo que permitan evaluar el comportamiento del sistema en el tiempo y verificar cuál es su eficiencia y prever oportunamente los trabajos de mantenimiento para mejorar las condiciones de operación del sistema. Será necesario considerar las obras accesorias para llevar a cabo esta actividad y cómo impactará en los costos de operación.

Para que la información generada en el presente trabajo sea útil se recomienda a quien utilice los pasos mencionados, para esta u otra zona cualquiera:

- La elaboración de cartografía temática con un sistema de información geográfica que incluya lo siguiente:
    - Censo de pozos de extracción de agua subterránea, con la mayor cantidad de información asociada a cada uno como: profundidad, uso, diámetro, ubicación de tramos ranurados del ademe.
    - Tipo de suelo
    - Uso de suelo
    - Fuentes potenciales de contaminación
    - Cuerpos de agua
    - Líneas de alcantarillado
    - Geología superficial
    - Profundidad del nivel freático
- Caracterización hidráulica del medio, además de las pruebas de infiltración, con pruebas como:
    - Ensayos tipo pulso
    - Ensayos tipo slug.
    - Pruebas de bombeo
- Caracterización geofísica del subsuelo mediante la utilización de métodos geofísicos.

Anexos

Las puertas de la sabiduría nunca están cerradas.

Benjamín Franklin

A.1. Análisis hidrometeorológico

El objetivo del análisis de ésta información es obtener la ecuación que relacione las variables de Intensidad, Duración y Frecuencia (IDF) de un evento de precipitación de corta duración. Sin embargo, para la obtención de la ecuación de forma

$$i = \frac{kT^m}{(d+c)^n}$$

Es necesario contar con registros pluviográficos de eventos de corta duración, por ejemplo 5, 10, 15, 30 minutos, etc.

Debido a que la zona de estudio no cuenta con información de este tipo, se optará por un método alterno para obtener una ecuación que nos relacione las variables IDF.

Este método es el propuesto por Chen[99], donde se hace uso de la siguiente ecuación:

$$i_t^T = \frac{ap_1^{10}\log\left(10^{2-F}T^{F-1}\right)}{(t+b)^c}$$

La cual es válida para períodos de retorno mayores a un año e intervalos de duración menores a 24 horas.

Donde:

I^T_t Es la intensidad de lluvia de duración t (minutos) y período de retorno T (años).

a,b y c son parámetros en función del cociente R, que se determinan utilizando la Figura A.1:

$$R = \frac{p_1^{10}}{p_{24}^{10}}$$

$$F = \frac{p_{24}^{100}}{p_{24}^{10}}$$

p^{10}_1 Es la intensidad de lluvia de una hora de duración y periodo de retorno de 10 años, en mm.

[99]Chen Lung Chen, M., 1983. Rainfall Intensity-Duration-Frecuency. Journal of Hydraulic Engineering. 109, 12.5

p^{10}_{24} Es la intensidad de una lluvia de 24 horas de duración y un periodo de retorno de 10 años, en mm.

p^{100}_{24} Es la intensidad de una lluvia de 24 horas de duración y un periodo de retorno de 100 años, en mm.

Los valores de p^{x}_{t} se obtienen mediante un análisis estadístico denominado análisis de frecuencia de los datos de lluvia, ajustándolos a las distintas funciones de distribución de probabilidad utilizadas en hidrología, como son la Normal, LogNormal, Gamma, Exponencial, Pearson, Gumbel, etc. y elegir la de mejor ajuste para realizar la estimación de los valores de intensidad requeridos.

Debido a que los registros de pluviómetro (lluvias acumuladas de 24 horas) se obtienen en un intervalo jo de medición, las láminas obtenidas en el análisis estadístico deben multiplicarse por 1.13 (denominado como corrección Weiss[100]).

Para obtener el valor de lluvia de una hora de duración y período de retorno de 10 años, debe realizarse el análisis de frecuencia para la lluvia de una hora de duración, pero ésta información no está disponible en la estación pluviométrica seleccionada.

Escalante y Reyes[101] analizaron 228 registros pluviográficos disponibles en la República Mexicana y determinaron el cociente de lluvia-duración R, para las estaciones climatológicas analizadas. Para la estación de Guanajuato, Gto. se obtuvo el valor promedio

$$R = 0.52.$$

Debido a la falta de información sobre la zona de estudio y a la cercanía con la estación Gto., se utiliza éste valor para determinar la precipitación de una hora de duración y diez años de período de retorno. De la gráfica mostrada en la Figura A.1, se obtienen los coeficientes a, b y c utilizando el valor propuesto de R.

A.1.1. Orden y período de retorno

De la información pluviométrica se tomaron las precipitaciones máximas diarias para cada año. A cada evento de precipitación se le asigna un valor T para designar un período de retorno conforme a la relación:

[100] Weiss, L. L. 1964. Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall. Journal of Hydraulics. Division. 90:77-82.
[101] Escalante S.C. y Reyes CH.L. Técnicas Estadísticas en Hidrología.

$$T = \frac{n+1}{m}$$

Donde:

m - es el número de orden, ordenado de mayor a menor.

n - es el número de datos.

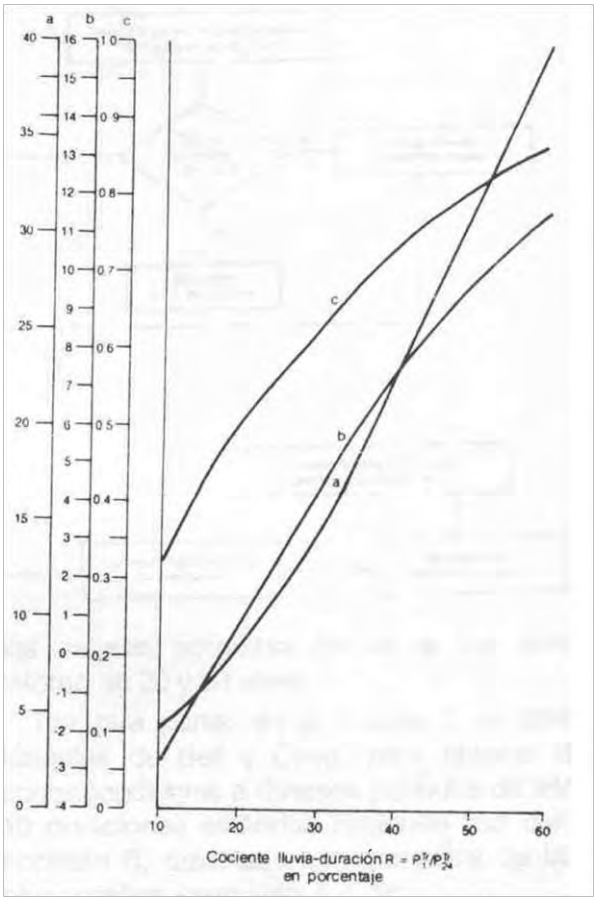
La probabilidad de ocurrencia de un evento está dada por la siguiente ecuación:

$$P(X \leq x) = \frac{T+1}{T}$$

A.1.2. Distribuciones de probabilidad

A continuación, se describen las distribuciones de probabilidad utilizadas para ajustar los datos de precipitación de la estación meteorológica seleccionada.

Figura A.1 Valores de los parámetros a, b y c, en función del cociente de lluvia-duración, R.



Fuente: Maidment, 1993.

A.1.2.1. Distribución Normal

La densidad de probabilidad normal[102] se define como:

$$F(x) = \frac{1}{\prod} e^{\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2}$$

Donde μ y σ son los parámetros de la distribución. Estos parámetros determinan la forma de la función f(x) y su posición en el eje x. Es posible demostrar que son respectivamente la media y la desviación estándar de la población y pueden estimarse como la media y desviación estándar de los datos. La función de probabilidad normal es:

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} \frac{1}{\sqrt{2\prod}\sigma} e^{\frac{1}{2}(\frac{x-\mu}{\sigma})^2} dx$$

Hoy día, no se conoce la solución analítica de la integral anterior, por lo que es necesario recurrir a métodos numéricos para evaluarla. Sin embargo, para hacer esto se requerirían tablas para cada valor de μ y σ, por lo que se ha definido la variable estandarizada:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Que normalmente está distribuida con media cero y desviación estándar unitaria. Dado un valor de x, es posible encontrar el valor de la probabilidad de ocurrencia a partir de dichas tablas. Para estimar el valor de x a partir de una probabilidad dada, el programa Excel devuelve el valor de x dados también los valores de la media y desviación estándar.

A.1.2.2. Distribución LogNormal

En esta función los logaritmos naturales de la variable aleatoria se distribuyen normalmente. La función de densidad de probabilidad es:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\prod}} \frac{1}{x\beta} e^{\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\alpha}{\beta}\right)^2}$$

Dónde α y β son los parámetros de la distribución, respectivamente la media y la desviación estándar de los logaritmos de la variable aleatoria, que se determinan de la siguiente forma:

[102] Aparicio Mijares F., Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa-Noriega Editores. Capítulo 9

$$\alpha = \sum_{i=1}^{n} \frac{lnx_i}{n}$$

$$\beta = [\sum_{i=1}^{n} \frac{(lnx_i - \alpha)^2}{n}]$$

La función de distribución de probabilidad se obtiene mediante tablas, estandarizando la variable como se define a continuación:

$$z = \frac{\ln x - \alpha}{\beta}$$

Al calcular primero la distribución de probabilidad, se debe despejar la variable a partir de la variable Z y el valor asignado, quedando despejada como sigue:

$$z = e^{z\beta+\alpha}$$

Dada la probabilidad, media y desviación estándar con el programa Excel es posible calcular la variable *ln x*, de tal manera que sólo sea necesario calcular el antilogaritmo de este valor para obtener la variable deseada.

A.1.2.3. Distribución Gumbel

Supóngase que se tienen N muestras, cada una de ellas de las cuales contiene n eventos. Si se selecciona el máximo x de los n eventos de cada muestra, es posible demostrar que a medida que n aumenta, la función de distribución de probabilidad de x tiende a:

$$F(x) = e^{e^{-\alpha(x-\beta)}}$$

Dónde α y β son los parámetros de la función. Y se estiman de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{\sigma_y}{S}$$

$$\beta = \bar{x} - \frac{\mu_y}{\alpha}$$

Dónde μ y σ_y se muestran en la Tabla A.1 con base en el tamaño muestral. Al despejar se tiene que:

$$x = \beta - \frac{1}{\alpha} \ln (\ln \left(\frac{T-1}{T}\right))$$

A.1.2.4. Distribución Pearson III

La función de densidad de probabilidad Pearson III se define como:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)}$$

donde α_1, β_1 y δ_1 son los parámetros de la función y Γ(β1) es la función Gamma. Los parámetros se evalúan a partir de n datos medidos, mediante el siguiente sistema de ecuaciones:

$$x = \alpha_1 \beta_1 + \delta_1$$

Tabla A.1 Valores de μ_y y σy en función del tamaño muestral.

n	μ_y	σ_y
10	0.4952	0.9496
15	0.5128	1.0206
20	0.5236	1.0628
25	0.5309	1.0914
30	0.5362	1.1124
35	0.5403	1.1285
40	0.5436	1.1413
45	0.5463	1.1518
50	0.5485	1.1607
55	0.5504	1.1682
60	0.5521	1.1747
65	0.5535	1.1803
70	0.5548	1.1854
75	0.5559	1.1898
80	0.5569	1.1938
85	0.5578	1.1974
90	0.5586	1.2007
95	0.5593	1.2037
100	0.5600	1.2065

Fuente: Aparicio

$$S = \alpha_1^2 \beta_1$$

$$\gamma = \frac{2}{\sqrt{\beta_1}}$$

Dónde x es la media de los datos, S^2 su varianza y γ su coeficiente de sesgo, que se define como:

$$\gamma = \sum_{i=1}^{n} \frac{(x_i - x)^3/n}{S^3}$$

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^x e^{-\left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)\left(\frac{x-\delta_1}{\alpha_1}\right)^{\beta-1}} dx$$

Sustituyendo

$$y = \frac{x - \delta_1}{\alpha_1}$$

La función de distribución de probabilidad es:

$$F(x) = \frac{1}{\alpha_1 \Gamma(\beta_1)} \int_0^x e^{-y y^{\beta-1}} dy$$

La distribución es una función de probabilidad del tipo ji cuadrada con 2β grados de libertad y X_i^2 = 2y. Dado el número de grados de libertad y la probabilidad, con el programa Excel es posible obtener el valor de la variable ξ^2, de tal manera que es posible estimar el valor de x.

A.1.3. Obtención de la ecuación IDF

A.1.3.1. Ajuste estadístico de eventos de precipitación

Para llevar a cabo el análisis hidrometeorológico, se utilizarán los registros pluviométricos de la estación Los Castillos, pues es la que presenta la mayor cantidad de datos en la zona de estudio.

De los registros pluviométricos diarios de la estación meteorológica, se extrajeron los registros máximos para cada año, comenzando desde 1951, pues en ese año se vuelven continuos los registros de la estación.

Tabla A.2 Eventos ordenados y probabilidad de ocurrencia

Año	Hmáx (mm)	Orden	T (período de retorno)	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de no ocurrencia
1957	126.00	1	59.00	0.0169	0.9831
1993	90.00	2	29.50	0.0339	0.9661
1973	83.60	3	19.67	0.0508	0.9492
1966	82.00	4	14.75	0.0678	0.9322
1998	77.20	5	11.80	0.0847	0.9153
2002	75.00	6	9.83	0.1017	0.8983
2001	73.20	7	8.43	0.1186	0.8814
1976	72.50	8	7.38	0.1356	0.8644
1988	69.50	9	6.56	0.1525	0.8475
1971	66.00	10	5.90	0.1695	0.8305
1986	64.50	11	5.36	0.1864	0.8136
1989	60.50	12	4.92	0.2034	0.7966
1987	60.30	13	4.54	0.2203	0.7797
1997	60.30	14	4.21	0.2373	0.7627
2003	60.30	15	3.93	0.2542	0.7458
1959	60.00	16	3.69	0.2712	0.7288
1975	59.00	17	3.47	0.2881	0.7119
2004	56.10	18	3.28	0.3051	0.6949
1990	55.40	19	3.11	0.3220	0.6780
1961	54.50	20	2.95	0.3390	0.6610
1972	53.50	21	2.81	0.3559	0.6441
1995	52.60	22	2.68	0.3729	0.6271
1953	51.70	23	2.57	0.3898	0.6102
1984	50.20	24	2.46	0.4068	0.5932
1992	49.70	26	2.27	0.4407	0.5593
1996	49.50	27	2.19	0.4576	0.5424
1977	48.70	28	2.11	0.4746	0.5254
1994	46.80	30	1.97	0.5085	0.4915
1955	46.00	31	1.90	0.5254	0.4746
1956	46.00	32	1.84	0.5424	0.4576
1978	46.00	33	1.79	0.5593	0.4407
1958	44.20	34	1.74	0.5763	0.4237
1999	41.30	35	1.69	0.5932	0.4068
1970	41.00	36	1.64	0.6102	0.3898
1974	41.00	37	1.59	0.6271	0.3729
1985	40.50	38	1.55	0.6441	0.3559
1951	40.00	39	1.51	0.6610	0.3390
1964	40.00	40	1.48	0.6780	0.3220
1967	40.00	41	1.44	0.6949	0.3051

1968	40.00	42	1.40	0.7119	0.2881
1981	39.80	43	1.37	0.7288	0.2712
1962	38.30	44	1.34	0.7458	0.2542
1952	37.00	45	1.31	0.7627	0.2373
2000	36.50	46	1.28	0.7797	0.2203
1963	34.00	47	1.26	0.7966	0.2034
1954	33.50	48	1.23	0.8136	0.1864
1991	32.40	49	1.20	0.8305	0.1695
1965	31.50	50	1.18	0.8475	0.1525
1960	27.80	51	1.16	0.8644	0.1356
1969	26.00	53	1.11	0.8983	0.1017
1982	24.20	54	1.09	0.9153	0.0847
1979	23.30	55	1.07	0.9322	0.0678
1983	18.60	56	1.05	0.9492	0.0508
1980	8.10	58	1.02	0.9831	0.0169

Elaboración propia con información de SMN.

A.1.3.1.1 Ajuste a probabilidad normal

Una vez que los datos fueron ordenados, se obtuvieron la media y desviación estándar de ellos, de tal manera que

$$\mu = 50.47 \text{ [mm/día]}$$

$$\sigma = 20.03 \text{ [mm/día]}$$

Dada la probabilidad determinada para cada evento en particular, se usa la función de Excel para determinar cuál es el valor de x dadas la media y desviación estándar.

Una vez que se determinó el valor de x, se realizó la estimación del error cuadrático con base en la ecuación

$$C = [\sum_{i=1}^{n} (x_{e1} - x_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Donde x_{e1} es el i-ésimo dato estimado y x_0 es el i-ésimo dato calculado con la función de distribución. En este caso el error cuadrático es 39.28 mm.

Tabla A. 3 Ajuste a la distribución de probabilidad normal.

Año	Hmáx (mm)	Orden	T (período de retorno)	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de no ocurrencia	Xcalc	Dif
1957	126.00	1	59.0	0.0169	0.9831	92.97	1,090.74
1993	90.00	2	29.5	0.0339	0.9661	87.06	8.62
1973	83.60	3	19.7	0.0508	0.9492	83.26	0.11
1966	82.00	4	14.8	0.0678	0.9322	80.37	2.64
1998	77.20	5	11.8	0.0847	0.9153	78.00	0.64
2002	75.00	6	9.8	0.1017	0.8983	75.96	0.92
2001	73.20	7	8.4	0.1186	0.8814	74.15	0.90
1976	72.50	8	7.4	0.1356	0.8644	72.52	0.00
1988	69.50	9	6.6	0.1525	0.8475	71.02	2.32
1971	66.00	10	5.9	0.1695	0.8305	69.63	13.18
1986	64.50	11	5.4	0.1864	0.8136	68.33	14.65
1989	60.50	12	4.9	0.2034	0.7966	67.09	43.49
1987	60.30	13	4.5	0.2203	0.7797	65.92	31.61
1997	60.30	14	4.2	0.2373	0.7627	64.80	20.25
2003	60.30	15	3.9	0.2542	0.7458	63.72	11.71
1959	60.00	16	3.7	0.2712	0.7288	62.68	7.18
1975	59.00	17	3.5	0.2881	0.7119	61.67	7.13
2004	56.10	18	3.3	0.3051	0.6949	60.69	21.05
1990	55.40	19	3.1	0.3220	0.6780	59.73	18.75
1961	54.50	20	3.0	0.3390	0.6610	58.79	18.43
1972	53.50	21	2.8	0.3559	0.6441	57.87	19.13
1995	52.60	22	2.7	0.3729	0.6271	56.97	19.10
1953	51.70	23	2.6	0.3898	0.6102	56.08	19.18
1984	50.20	24	2.5	0.4068	0.5932	55.20	24.99
1992	49.70	26	2.3	0.4407	0.5593	53.46	14.17
1996	49.50	27	2.2	0.4576	0.5424	52.61	9.65
1977	48.70	28	2.1	0.4746	0.5254	51.75	9.31
1994	46.80	30	2.0	0.5085	0.4915	50.05	10.55
1955	46.00	31	1.9	0.5254	0.4746	49.20	10.22
1956	46.00	32	1.8	0.5424	0.4576	48.34	5.49
1978	46.00	33	1.8	0.5593	0.4407	47.48	2.20
1958	44.20	34	1.7	0.5763	0.4237	46.62	5.86
1999	41.30	35	1.7	0.5932	0.4068	45.75	19.79
1970	41.00	36	1.6	0.6102	0.3898	44.87	14.97
1974	41.00	37	1.6	0.6271	0.3729	43.98	8.87
1985	40.50	38	1.6	0.6441	0.3559	43.07	6.63
1951	40.00	39	1.5	0.6610	0.3390	42.15	4.64
1964	40.00	40	1.5	0.6780	0.3220	41.22	1.48
1967	40.00	41	1.4	0.6949	0.3051	40.26	0.07

1968	40.00	42	1.4	0.7119	0.2881	39.28	0.52
1981	39.80	43	1.4	0.7288	0.2712	38.27	2.35
1962	38.30	44	1.3	0.7458	0.2542	37.23	1.15
1952	37.00	45	1.3	0.7627	0.2373	36.15	0.73
2000	36.50	46	1.3	0.7797	0.2203	35.03	2.17
1963	34.00	47	1.3	0.7966	0.2034	33.85	0.02
1954	33.50	48	1.2	0.8136	0.1864	32.62	0.77
1991	32.40	49	1.2	0.8305	0.1695	31.32	1.17
1965	31.50	50	1.2	0.8475	0.1525	29.93	2.48
1960	27.80	51	1.2	0.8644	0.1356	28.43	0.40
1969	26.00	53	1.1	0.8983	0.1017	24.99	1.02
1982	24.20	54	1.1	0.9153	0.0847	22.95	1.56
1979	23.30	55	1.1	0.9322	0.0678	20.57	7.43
1983	18.60	56	1.1	0.9492	0.0508	17.68	0.84
1980	8.10	58	1.0	0.9831	0.0169	7.97	0.02

Elaboración propia

A.1.3.1.2 Ajuste a probabilidad Lognormal

Una vez que los datos fueron ordenados, se obtuvieron la media y desviación estándar de ellos (ln x), de tal manera que:

$$\mu = 46.46 \text{ [mm/día]}$$

$$\sigma = 1.55 \text{ [mm/día]}$$

Dada la probabilidad determinada para cada evento en particular, se usa la función de Excel para determinar cuál es el valor de x dadas la media y desviación estándar. Una vez que se determinó el valor de x, se realizó la estimación del error cuadrático con base en la ecuación:

$$C = [\sum_{i=1}^{n} (x_{e1} - x_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Donde x_{e1} es el i-ésimo dato estimado y x_0 es el i-ésimo dato calculado con la función de distribución. En este caso el error cuadrático es 30.39.

Tabla A. 4 Ajuste a la distribución de probabilidad Lognormal.

Año	Hmáx (mm)	Orden	T (período de retorno)	Probabilidad de no ocurrencia	Ln (xreal)	ln (xcalc)	Xcalc	Xcalc-Xreal
1957	126.00	1	59.0	0.9831	4.84	4.77	117.50	72.26
1993	90.00	2	29.5	0.9661	4.50	4.64	103.28	176.30
1973	83.60	3	19.7	0.9492	4.43	4.55	95.05	131.22
1966	82.00	4	14.8	0.9322	4.41	4.49	89.24	52.43
1998	77.20	5	11.8	0.9153	4.35	4.44	84.73	56.71
2002	75.00	6	9.8	0.8983	4.32	4.39	81.04	36.44
2001	73.20	7	8.4	0.8814	4.29	4.36	77.90	22.12
1976	72.50	8	7.4	0.8644	4.28	4.32	75.18	7.16
1988	69.50	9	6.6	0.8475	4.24	4.29	72.76	10.61
1971	66.00	10	5.9	0.8305	4.19	4.26	70.58	20.99
1986	64.50	11	5.4	0.8136	4.17	4.23	68.60	16.81
1989	60.50	12	4.9	0.7966	4.10	4.20	66.78	39.43
1987	60.30	13	4.5	0.7797	4.10	4.18	65.09	22.96
1997	60.30	14	4.2	0.7627	4.10	4.15	63.52	10.34
2003	60.30	15	3.9	0.7458	4.10	4.13	62.04	3.02
1959	60.00	16	3.7	0.7288	4.09	4.11	60.64	0.41
1975	59.00	17	3.5	0.7119	4.08	4.08	59.32	0.10
2004	56.10	18	3.3	0.6949	4.03	4.06	58.06	3.85
1990	55.40	19	3.1	0.6780	4.01	4.04	56.86	2.13
1961	54.50	20	3.0	0.6610	4.00	4.02	55.71	1.46
1972	53.50	21	2.8	0.6441	3.98	4.00	54.60	1.21
1995	52.60	22	2.7	0.6271	3.96	3.98	53.53	0.87
1953	51.70	23	2.6	0.6102	3.95	3.96	52.50	0.65
1984	50.20	24	2.5	0.5932	3.92	3.94	51.50	1.70
1992	49.70	26	2.3	0.5593	3.91	3.90	49.59	0.01
1996	49.50	27	2.2	0.5424	3.90	3.89	48.67	0.69
1977	48.70	28	2.1	0.5254	3.89	3.87	47.77	0.86
1994	46.80	30	2.0	0.4915	3.85	3.83	46.03	0.60
1955	46.00	31	1.9	0.4746	3.83	3.81	45.18	0.68
1956	46.00	32	1.8	0.4576	3.83	3.79	44.34	2.75
1978	46.00	33	1.8	0.4407	3.83	3.77	43.52	6.15
1958	44.20	34	1.7	0.4237	3.79	3.75	42.71	2.23
1999	41.30	35	1.7	0.4068	3.72	3.74	41.90	0.36
1970	41.00	36	1.6	0.3898	3.71	3.72	41.10	0.01
1974	41.00	37	1.6	0.3729	3.71	3.70	40.31	0.47
1985	40.50	38	1.6	0.3559	3.70	3.68	39.52	0.95
1951	40.00	39	1.5	0.3390	3.69	3.66	38.74	1.59
1964	40.00	40	1.5	0.3220	3.69	3.64	37.95	4.18
1967	40.00	41	1.4	0.3051	3.69	3.62	37.17	8.01

1968	40.00	42	1.4	0.2881	3.69	3.59	36.38	13.10
1981	39.80	43	1.4	0.2712	3.68	3.57	35.59	17.74
1962	38.30	44	1.3	0.2542	3.65	3.55	34.79	12.34
1952	37.00	45	1.3	0.2373	3.61	3.53	33.98	9.13
2000	36.50	46	1.3	0.2203	3.60	3.50	33.16	11.18
1963	34.00	47	1.3	0.2034	3.53	3.48	32.32	2.83
1954	33.50	48	1.2	0.1864	3.51	3.45	31.46	4.16
1991	32.40	49	1.2	0.1695	3.48	3.42	30.58	3.33
1965	31.50	50	1.2	0.1525	3.45	3.39	29.66	3.38
1960	27.80	51	1.2	0.1356	3.33	3.36	28.71	0.82
1969	26.00	53	1.1	0.1017	3.26	3.28	26.63	0.40
1982	24.20	54	1.1	0.0847	3.19	3.24	25.47	1.61
1979	23.30	55	1.1	0.0678	3.15	3.19	24.18	0.78
1983	18.60	56	1.1	0.0508	2.92	3.12	22.70	16.84
1980	8.10	58	1.0	0.0169	2.09	2.91	18.37	105.42

Elaboración propia

A.1.3.1.3 Ajuste a probabilidad Gumbel

Para la cantidad de datos (58) que se tienen registrados, las variables μ_y y σ_y toman los siguientes valores:

$$\mu_y = 0.5504$$

$$\sigma_y = 1.1682$$

Ya que los datos fueron ordenados, se obtuvieron la media y desviación estándar del conjunto de datos, de tal manera que:

$$X = 50.47 \text{ [mm/día]}$$

$$S = 20.03 \text{ [mm/día]}$$

Una vez que se determinó el valor de x, se realizó la estimación del error cuadrático con base en la ecuación:

$$C = [\sum_{i=1}^{n} (x_{e1} - x_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Donde x_{e1} es el i-ésimo dato estimado y x_0 es el i-ésimo dato calculado con la función de distribución. En este caso el error cuadrático es 27.08.

Tabla A.5 Ajuste a la distribución de probabilidad Gumbel.

Año	Hmáx (mm)	Orden	T (período de retorno)	Probabilidad de ocurrencia	Probabilidad de no ocurrencia	ln[- ln (T-1)/T]	X	Xcalc-Xreal
1957	126.00	1	59.0	0.0169	0.9831	-4.07	110.82	230.47
1993	90.00	2	29.5	0.0339	0.9661	-3.37	98.78	77.14
1973	83.60	3	19.7	0.0508	0.9492	-2.95	91.68	65.26
1966	82.00	4	14.8	0.0678	0.9322	-2.66	86.59	21.08
1998	77.20	5	11.8	0.0847	0.9153	-2.42	82.61	29.26
2002	75.00	6	9.8	0.1017	0.8983	-2.23	79.32	18.70
2001	73.20	7	8.4	0.1186	0.8814	-2.07	76.52	11.03
1976	72.50	8	7.4	0.1356	0.8644	-1.93	74.07	2.46
1988	69.50	9	6.6	0.1525	0.8475	-1.80	71.88	5.68
1971	66.00	10	5.9	0.1695	0.8305	-1.68	69.91	15.27
1986	64.50	11	5.4	0.1864	0.8136	-1.58	68.10	12.97
1989	60.50	12	4.9	0.2034	0.7966	-1.48	66.44	35.23
1987	60.30	13	4.5	0.2203	0.7797	-1.39	64.89	21.03
1997	60.30	14	4.2	0.2373	0.7627	-1.31	63.43	9.82
2003	60.30	15	3.9	0.2542	0.7458	-1.23	62.07	3.12
1959	60.00	16	3.7	0.2712	0.7288	-1.15	60.77	0.60
1975	59.00	17	3.5	0.2881	0.7119	-1.08	59.54	0.29
2004	56.10	18	3.3	0.3051	0.6949	-1.01	58.37	5.14
1990	55.40	19	3.1	0.3220	0.6780	-0.95	57.24	3.39
1961	54.50	20	3.0	0.3390	0.6610	-0.88	56.16	2.76
1972	53.50	21	2.8	0.3559	0.6441	-0.82	55.12	2.61
1995	52.60	22	2.7	0.3729	0.6271	-0.76	54.11	2.27
1953	51.70	23	2.6	0.3898	0.6102	-0.71	53.13	2.04
1984	50.20	24	2.5	0.4068	0.5932	-0.65	52.18	3.91
1992	49.70	26	2.3	0.4407	0.5593	-0.54	50.35	0.42
1996	49.50	27	2.2	0.4576	0.5424	-0.49	49.46	0.00
1977	48.70	28	2.1	0.4746	0.5254	-0.44	48.59	0.01
1994	46.80	30	2.0	0.5085	0.4915	-0.34	46.90	0.01
1955	46.00	31	1.9	0.5254	0.4746	-0.29	46.08	0.01
1956	46.00	32	1.8	0.5424	0.4576	-0.25	45.26	0.55
1978	46.00	33	1.8	0.5593	0.4407	-0.20	44.45	2.40
1958	44.20	34	1.7	0.5763	0.4237	-0.15	43.65	0.30
1999	41.30	35	1.7	0.5932	0.4068	-0.11	42.85	2.41
1970	41.00	36	1.6	0.6102	0.3898	-0.06	42.06	1.12
1974	41.00	37	1.6	0.6271	0.3729	-0.01	41.27	0.07
1985	40.50	38	1.6	0.6441	0.3559	0.03	40.48	0.00
1951	40.00	39	1.5	0.6610	0.3390	0.08	39.69	0.10
1964	40.00	40	1.5	0.6780	0.3220	0.12	38.89	1.23
1967	40.00	41	1.4	0.6949	0.3051	0.17	38.09	3.64

1968	40.00	42	1.4	0.7119	0.2881	0.22	37.29	7.37
1981	39.80	43	1.4	0.7288	0.2712	0.27	36.47	11.09
1962	38.30	44	1.3	0.7458	0.2542	0.31	35.64	7.07
1952	37.00	45	1.3	0.7627	0.2373	0.36	34.80	4.84
2000	36.50	46	1.3	0.7797	0.2203	0.41	33.94	6.57
1963	34.00	47	1.3	0.7966	0.2034	0.47	33.05	0.90
1954	33.50	48	1.2	0.8136	0.1864	0.52	32.14	1.85
1991	32.40	49	1.2	0.8305	0.1695	0.57	31.19	1.45
1965	31.50	50	1.2	0.8475	0.1525	0.63	30.21	1.68
1960	27.80	51	1.2	0.8644	0.1356	0.69	29.16	1.86
1969	26.00	53	1.1	0.8983	0.1017	0.83	26.86	0.73
1982	24.20	54	1.1	0.9153	0.0847	0.90	25.54	1.80
1979	23.30	55	1.1	0.9322	0.0678	0.99	24.06	0.57
1983	18.60	56	1.1	0.9492	0.0508	1.09	22.31	13.79
1980	8.10	58	1.0	0.9831	0.0169	1.41	16.93	77.97

Elaboración propia

A.1.3.1.4 Ajuste a probabilidad Pearson

Para la cantidad de datos que se tienen registrados, los parámetros de la función toman los siguientes valores:

S = 20.03 [mm/día]

μ = 50.47 [mm/día]

γ = 0.91

β = 4.58

α = 9.10

v = 9.69 = 10

δ = 6.37

Una vez que se determinó el valor de x, se realizó la estimación del error cuadrático con base en la ecuación:

$$C = [\sum_{i=1}^{n} (x_{e1} - x_0)^2]^{\frac{1}{2}}$$

Donde x_{e1} es el i-ésimo dato estimado y x_0 es el i-ésimo dato calculado con la función de distribución. En este caso el error cuadrático es 32.18.

Tabla A.6 Ajuste a la distribución de probabilidad Pearson.

Año	Hmáx (mm)	Orden	T (período de retorno)	Probabilidad de ocurrencia	(xi-x)^3	Xi2	y	X	Xcalc-Xreal
1957	126.00	1	59.0	0.0169	430,812.38	21.66	10.83	104.91	444.80
1993	90.00	2	29.5	0.0339	61,751.31	19.54	9.77	95.28	27.92
1973	83.60	3	19.7	0.0508	36,349.97	18.25	9.13	89.42	33.86
1966	82.00	4	14.8	0.0678	31,333.11	17.31	8.65	85.13	9.77
1998	77.20	5	11.8	0.0847	19,089.66	16.56	8.28	81.71	20.30
2002	75.00	6	9.8	0.1017	14,752.86	15.93	7.96	78.84	14.77
2001	73.20	7	8.4	0.1186	11,737.21	15.38	7.69	76.37	10.05
1976	72.50	8	7.4	0.1356	10,685.69	14.90	7.45	74.18	2.83
1988	69.50	9	6.6	0.1525	6,887.12	14.47	7.24	72.21	7.37
1971	66.00	10	5.9	0.1695	3,742.59	14.08	7.04	70.42	19.54
1986	64.50	11	5.4	0.1864	2,759.27	13.71	6.86	68.77	18.21
1989	60.50	12	4.9	0.2034	1,007.80	13.38	6.69	67.23	45.29
1987	60.30	13	4.5	0.2203	948.68	13.06	6.53	65.79	30.15
1997	60.30	14	4.2	0.2373	948.68	12.76	6.38	64.43	17.10
2003	60.30	15	3.9	0.2542	948.68	12.48	6.24	63.15	8.12
1959	60.00	16	3.7	0.2712	864.41	12.21	6.11	61.93	3.72
1975	59.00	17	3.5	0.2881	619.76	11.95	5.98	60.76	3.10
2004	56.10	18	3.3	0.3051	178.07	11.71	5.85	59.64	12.52
1990	55.40	19	3.1	0.3220	119.53	11.47	5.74	58.56	9.98
1961	54.50	20	3.0	0.3390	65.25	11.24	5.62	57.52	9.11
1972	53.50	21	2.8	0.3559	27.71	11.02	5.51	56.51	9.06
1995	52.60	22	2.7	0.3729	9.61	10.81	5.40	55.53	8.60
1953	51.70	23	2.6	0.3898	1.84	10.60	5.30	54.58	8.30
1984	50.20	24	2.5	0.4068	-0.02	10.39	5.20	53.65	11.92
1992	49.70	26	2.3	0.4407	-0.46	10.00	5.00	51.86	4.66
1996	49.50	27	2.2	0.4576	-0.92	9.81	4.90	50.99	2.21
1977	48.70	28	2.1	0.4746	-5.58	9.62	4.81	50.13	2.05
1994	46.80	30	2.0	0.5085	-49.60	9.25	4.63	48.46	2.75
1955	46.00	31	1.9	0.5254	-89.56	9.07	4.54	47.64	2.68
1956	46.00	32	1.8	0.5424	-89.56	8.89	4.45	46.83	0.68
1978	46.00	33	1.8	0.5593	-89.56	8.72	4.36	46.02	0.00
1958	44.20	34	1.7	0.5763	-246.97	8.54	4.27	45.22	1.05
1999	41.30	35	1.7	0.5932	-772.12	8.37	4.18	44.43	9.79
1970	41.00	36	1.6	0.6102	-850.37	8.19	4.10	43.64	6.95
1974	41.00	37	1.6	0.6271	-850.37	8.02	4.01	42.85	3.41
1985	40.50	38	1.6	0.6441	-992.24	7.84	3.92	42.06	2.43

1951	40.00	39	1.5	0.6610	-1,149.07	7.67	3.84	41.27	1.60
1964	40.00	40	1.5	0.6780	-1,149.07	7.50	3.75	40.47	0.22
1967	40.00	41	1.4	0.6949	-1,149.07	7.32	3.66	39.67	0.11
1968	40.00	42	1.4	0.7119	-1,149.07	7.14	3.57	38.87	1.28
1981	39.80	43	1.4	0.7288	-1,216.16	6.96	3.48	38.05	3.05
1962	38.30	44	1.3	0.7458	-1,804.30	6.78	3.39	37.23	1.15
1952	37.00	45	1.3	0.7627	-2,446.23	6.60	3.30	36.39	0.37
2000	36.50	46	1.3	0.7797	-2,728.78	6.41	3.21	35.54	0.93
1963	34.00	47	1.3	0.7966	-4,470.98	6.22	3.11	34.66	0.44
1954	33.50	48	1.2	0.8136	-4,890.56	6.02	3.01	33.76	0.07
1991	32.40	49	1.2	0.8305	-5,904.30	5.82	2.91	32.83	0.18
1965	31.50	50	1.2	0.8475	-6,830.96	5.60	2.80	31.86	0.13
1960	27.80	51	1.2	0.8644	-11,657.05	5.38	2.69	30.85	9.27
1969	26.00	53	1.1	0.8983	-14,659.49	4.89	2.45	28.62	6.88
1982	24.20	54	1.1	0.9153	-18,137.70	4.62	2.31	27.37	10.07
1979	23.30	55	1.1	0.9322	-20,066.16	4.31	2.16	25.98	7.20
1983	18.60	56	1.1	0.9492	-32,382.68	3.96	1.98	24.38	33.44
1980	8.10	58	1.0	0.9831	-76,085.28	2.93	1.46	19.69	134.39

Elaboración propia

A.1.3.2. Función de mejor ajuste

La función de mejor ajuste, con base en el análisis del error cuadrático es la distribución de Pearson. Con base en esta distribución se estimaron los valores de precipitación para un Tr de 10 y 100 años, mostrados a continuación:

$$p^{10}_{24} = 79.63$$

$$p^{100}_{24} = 119.93$$

A.1.4. Ecuación IDF

Tomando en cuenta que el parámetro R es igual a 0.52, de la Figura A.1 se obtienen los valores para los siguientes parámetros:

$$a = 33 \; b = 10 \; c = 0.82$$

Al aplicar la corrección de Weiss las precipitaciones para 100 y 10 años de período de retorno toman los siguientes valores:

$$p^{10}_{24} = 89.98$$

$$p^{100}_{24} = 135.52$$

El cociente F que relaciona las variables anteriores toma el valor:

$$F = 135.52/89.98$$

$$F = 1.51$$

Al despejar p^{10}_1 de R, se tiene que:

$$p^{10}_1 = Rp^{10}_{24}$$

$$p^{10}_1 = 0.52 * 89.98$$

$$p^{10}_1 = 46.79$$

Con estos parámetros la ecuación IDF toma la siguiente forma:

$$i_t^T = \frac{ap_1^{10}\log\left(10^{2-F}T^{F-1}\right)}{(t+b)^c}$$

$$i_t^T = \frac{33 * 46.79 * \log\left(10^{2-1.51}T^{1.51-1}\right)}{(t+10)^{0.82}}$$

A.2. Geología

A.2.1. Escala de tiempo geológico

La escala de tiempo geológico es un marco de referencia que sirve para referenciar los eventos de la historia de la tierra ordenados cronológicamente. La escala resume resultados del trabajo realizado por naturalistas, geólogos, y otros especialistas de ciencias de la tierra. Desde 1974 la Comisión Internacional de Estratigrafía elaboró formalmente una escala de tiempo mostrada en la Figura A.2.

A.2.2. Génesis de las rocas

Con base en el proceso formador de rocas, estas pueden clasificarse en tres grandes grupos. A continuación se describen cada uno de ellos.

A.2.2.1. Rocas ígneas

Las rocas ígneas (del griego ignis que significa fuego) se forman cuando el magma se enfría y solidifica. El magma es roca fundida que se forma en varias profundidades de la corteza terrestre y el manto superior. A medida que se enfría el magma, se van formando y creciendo los cristales de varios minerales. Al enfriarse el magma en el interior de la corteza se enfría lentamente durante miles de años; ésta pérdida gradual de calor permite el desarrollo de cristales relativamente grandes antes de que todo el magma se solidifique por completo. Este tipo de rocas ígneas de grano grueso que se forman muy por debajo de la

superficie terrestre se denominan plutónicas; un ejemplo de este tipo de rocas es el granito, ver Figura A.3.

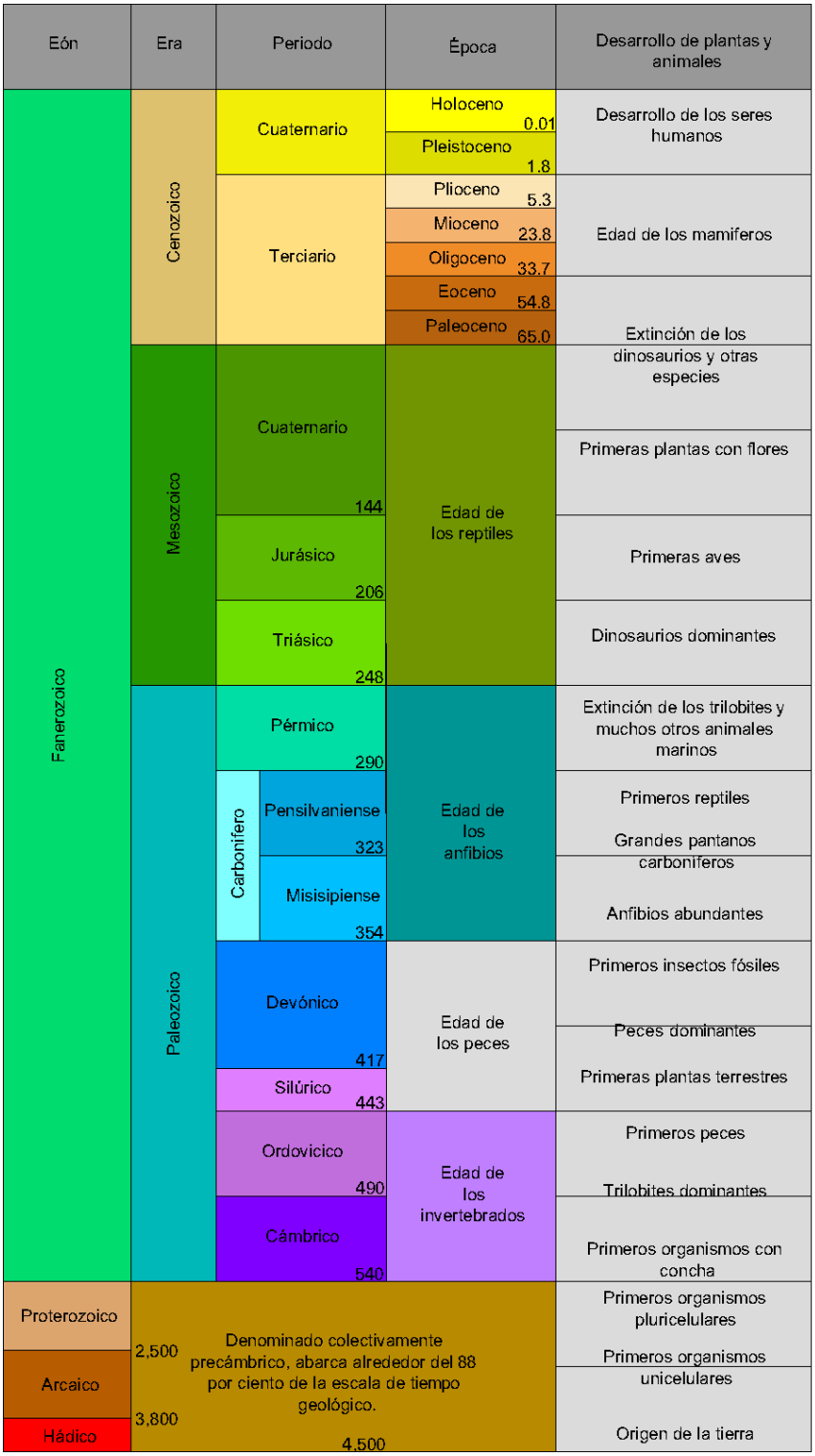
En ocasiones el magma se abre paso hacia la superficie terrestre, como sucede durante una erupción volcánica. En estas condiciones se enfría rápidamente y no hay tiempo para que se desarrollen grandes cristales. De esta manera, se produce la formación simultánea de muchos cristales pequeños. Las rocas ígneas que se forman en la superficie se denominan volcánicas y suelen ser de grano no. Uno ejemplo de este tipo de rocas es el basalto.

A.2.2.2. Rocas sedimentarias

Los sedimentos son la materia prima de las rocas sedimentarias y se acumulan en capas en la superficie de la tierra. Estos materiales se forman a partir de la descomposición de otras rocas debido al intemperismo o meteorización de éstas. Los procesos físicos fragmentan las rocas en piezas más pequeñas sin modificar su composición. Por otro lado, los procesos químicos convierten los minerales en otros nuevos y en sustancias fácilmente solubles en agua.

Los sedimentos se convierten en roca o se litifican por uno de los procesos siguientes. La compactación tiene lugar a medida que el peso de los materiales suprayacentes comprime los sedimentos en masas más densas. La cementación se produce conforme el agua que contiene sustancias disueltas se filtra a través de los espacios intergranulares del sedimento. Con el tiempo el material disuelto en el agua se precipita entre los granos y los cementa creando así una masa sólida. Los sedimentos que se originan y son transportados como partículas sólidas se denominan sedimentos detríticos y las rocas que la forman son llamadas rocas sedimentarias detríticas. Ejemplos de estas son la lutita y la arenisca, ver Figura A.4. La principal base para distinguir las rocas sedimentarias químicas es su composición química, que son formadas por soluciones químicas. Ejemplos de estas rocas son calizas y dolomías, ver Figura A.5.

Figura A.2 Escala de tiempo geológico.



Tomado de Tarbuck, 1991.

A.2.2.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas se producen a partir de rocas ígneas, sedimentarias o incluso otras rocas metamórficas. Así, cada roca tiene una roca madre o formadora. La mayoría de los cambios tiene lugar a elevadas presiones y temperaturas que se dan en la profundidad de la corteza terrestre y el manto superior.

La mayor parte del metamorfismo sucede en uno de estos tres ambientes:

1. Cuando un cuerpo magmático intruye en la roca, tiene lugar el metamorfismo térmico o de contacto. En este caso, el cambio está controlado por un aumento de la temperatura dentro de la roca huésped que rodea una intrusión ígnea.

2. El metamorfismo hidrotermal implica alteraciones químicas que se producen cuando el agua caliente rica en iones circula a través de las fracturas de la roca. Este tipo de metamorfismo, suele asociarse con la actividad ígnea que proporciona el calor necesario, para provocar reacciones químicas y hacer que estos fluidos circulen a través de la roca.

3. Durante la formación de las montañas, grandes cantidades de rocas enterradas a una gran profundidad están, sujetas a las presiones dirigidas y a las temperaturas elevadas asociadas con la deformación a gran escala denominada metamorfismo regional.

El grado de metamorfismo se refleja en la textura de la roca y la composición mineral. Durante el metamorfismo regional, los cristales de algunos minerales recristalizarán con una orientación perpendicular a la dirección de la fuerza compresiva. La alineación mineral resultante da a la roca una textura en láminas o en bandas llamadas foliación. Como ejemplo de estas rocas se tienen al esquisto o gneiss.

No todas las rocas metamórficas presentan una textura foliada. Se dice que estas rocas son no foliadas. Las rocas metamórficas compuestas por un sólo mineral que forma cristales equidimensionales no son visiblemente foliadas. Como ejemplo de estas rocas se tienen al mármol o la cuarcita.

A.2.3. Composición de las rocas

A.2.3.1. Rocas ígneas

Las rocas ígneas están compuestas principalmente por silicatos. Sin embargo, su composición mineral está determinada por la composición química del

magma a partir del cual cristaliza. El sílice es el principal constituyente del magma (silicio y oxígeno), más los iones de Aluminio (Al), Calcio (Ca), Sodio (Na), Potasio (K), Magnesio (Mg) y Fierro (Fe), y constituyen aproximadamente el 98% del peso del magma.

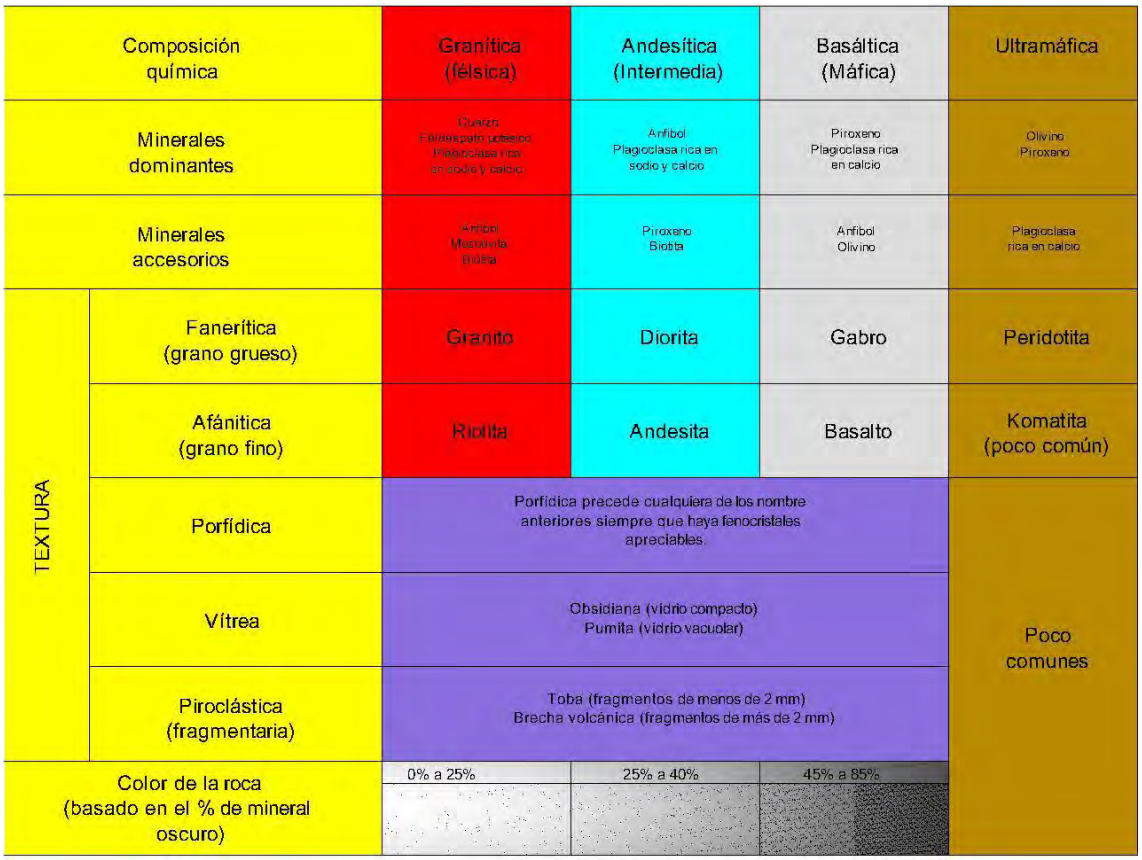
Conforme el magma se enfría y solidifica los elementos mencionados se combinan para formar dos grupos de silicatos: oscuros o ferromagnesianos, ricos en hierro y magnesio con bajo contenido de sílice. El olivino, piroxeno, anfíbol y biotita son los constituyentes ferromagnesianos más comunes de la corteza terrestre. Los silicatos claros contienen mayores cantidades de potasio, sodio y calcio que de hierro y magnesio. Entre los silicatos claros se cuentan el cuarzo, la moscovita y el grupo mineral más abundante, los feldespatos o plagioclasas, que constituyen al menos el 40% de la mayoría de las rocas ígneas.

Las rocas ígneas en las cuales el cuarzo y feldespato son los minerales dominantes tienen una composición granítica, también son denominadas cómo rocas félsicas. Este tipo de rocas son ricas en sílice (aproximadamente el 70%) y son los principales constituyentes de la corteza continental.

Las rocas que son ricas en silicatos oscuros y plagioclasas rica en calcio (pero no en cuarzo, menos del 50%) tienen una composición basáltica. Debido a su contenido en hierro, las rocas máficas son normalmente más oscuras y densas que otras rocas ígneas. Los basaltos constituyen el suelo oceánico, así como muchas islas localizadas dentro de las cuencas oceánicas.

Como se mencionó anteriormente las rocas ígneas son clasificadas o agrupadas en función de su textura y de su composición mineral. Siendo resultado de distintas historias de enfriamiento mientras que la composición lógica de una roca ígnea es consecuencia del contenido químico de su magma primario. En la Figura A.3 se muestra la clasificación de las rocas ígneas en función de su composición mineral y textura. Las rocas de grano grueso son plutónicas o intrusivas y se solidifican en profundidad debajo de la superficie. Las rocas de grano no son volcánicas o pueden solidificar como pequeños plutones cercanos a la superficie. En las rocas ultramáficas son oscuras y densas, compuestas en su totalidad por minerales que contienen hierro y magnesio.

Figura A.3 Clasificación de los principales grupos de rocas ígneas.



Tomado de Tarbuck, 1991.

A.2.3.2. Rocas sedimentarias

Como se mencionó anteriormente, los sedimentos tienen dos orígenes, por descomposición mecánica y química. El principal criterio para clasificar las rocas sedimentarias detríticas es el tamaño de los clastos, mientras que para las rocas químicas lo es su composición mineral. Aunque muchas rocas sedimentarias de tipo químico contienen pequeñas cantidades de sedimentos detríticos y viceversa.

Se utilizan dos texturas para clasificar las rocas sedimentarias, clásticas y no clásticas, donde el término clástico significa roto. Las rocas que exhiben una textura clástica están formadas por fragmentos discretos y clastos que están cementados y compactados juntos.

Algunas rocas sedimentarias químicas tienen una textura no clástica o cristalina en la cual los minerales forman un mosaico de cristales intercrecidos.

Figura A.4 Clasificación de las rocas sedimentarias detríticas.

Rocas sedimentarias detríticas		
Textura clástica Tamaño del clasto	Nombre del sedimento	Nombre del sedimento
Grueso (más de 2 mm)	Grava (clastos redondeados)	Conglomerado
	Grava (clastos angulosos)	Brecha
Medio (de 1/16 a 2 mm)	Arena (Si el feldespato es abundante la roca se denomina arcosa)	Arenisca
Fino (de 1/16 a 1/256 mm)	Limo	Limolita
Muy fino (menos de 1/256 mm)	Arcilla	Lutita

Tomado de Tarbuck, 1991.

A.2.3.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas pueden clasificarse en líneas generales según el tipo de foliación que exhiben y según la composición química de la roca a partir de la cual se generan. En la Figura A.6 se muestran las rocas metamórficas más comunes.

Figura A.5 Clasificación de las rocas sedimentarias químicas.

<table>
<tr><th colspan="4">Rocas sedimentarias químicas</th></tr>
<tr><th>Composición</th><th>Textura</th><th colspan="2">Nombre de la roca</th></tr>
<tr><td rowspan="4">Calcita CaCO3</td><td>No clástica: cristalino de fino a grueso</td><td colspan="2">Caliza cristalina</td></tr>
<tr><td>Clástica: caparazones y fragmentos de caparazón visibles, cementados débilmente</td><td colspan="2">Travertino</td></tr>
<tr><td>Clástica: caparazones y fragmentos de caparazón de diversos tamaños cementados con cemento de calcita</td><td>Coquina</td><td rowspan="3">Caliza Bioquímica</td></tr>
<tr><td>Clástica: caparazones y arcilla microscópicos</td><td>Caliza fosilifera</td></tr>
<tr><td>Cuarzo, SiO2</td><td>No clástica: cristalino muy fino</td><td>Creta</td></tr>
<tr><td>Yeso CaSO4*2H2O</td><td>No clástica: cristalino de fino a grueso</td><td colspan="2">Yeso</td></tr>
<tr><td>Halita, NaCl</td><td>No clástica: cristalino de fino a grueso</td><td colspan="2">Salgema</td></tr>
<tr><td>Fragmentos vegetales alterados</td><td>No clástica:materia orgánica de grano fino</td><td colspan="2">Hulla</td></tr>
</table>

Tomado de Tarbuck, 1991.

Figura A.6 Clasificación de las rocas metamórficas comunes.

Nombre de la roca		Textura	Tamaño de grano	Observaciones	Protolito
Pizarra	Aumento de metamorfismo	Foliada	Muy fino	Pizarrosidad excelente, superficies lisas sin brillo	Lutitas, Pelitas
Filita			Fino	Se rompe a lo largo de superficies onduladas, brillo satinado	Pizarra
Esquisto			Medio a grueso	Predominan los minerales micáceos, foliación escamosa	Filita
Gneis			Medio a grueso	Bandeado composicional debido a la segregación de los minerales	Esquisto, granito o rocas volcánicas
Migmatita			Medio a grueso	Roca bandeada con zonas de minerales cristalinos claros	Gneis, esquisto
Milonita		Poco Foliada	Fino	Cuando el grano es muy fino, parece sílex, suele romperse en láminas	Cualquier tipo de roca
Metaconglomerado			De grano grueso	Cantos alargados con orientación preferente	Conglomerado rico en cuarzo
Mármol		No foliada	Medio a grueso	Granos de calcita o dolomita entrelazados	Caliza, dolomía
Cuarcita			Medio a grueso	Granos de cuarzo fundidos, masiva, muy dura	Cuarzoarenita
Corneana			Fino	Normalmente, roca masiva oscura con brillo mate	Cualquier tipo de roca
Antracita			Fino	Roca negra brillante que puede mostrar fractura concoide	Carbón bituminoso
Brecha de falla			Medio a muy grueso	Fragmentos rotos con una disposición aleatoria	Cualquier tipo de roca

Tomado de Tarbuck, 1991.

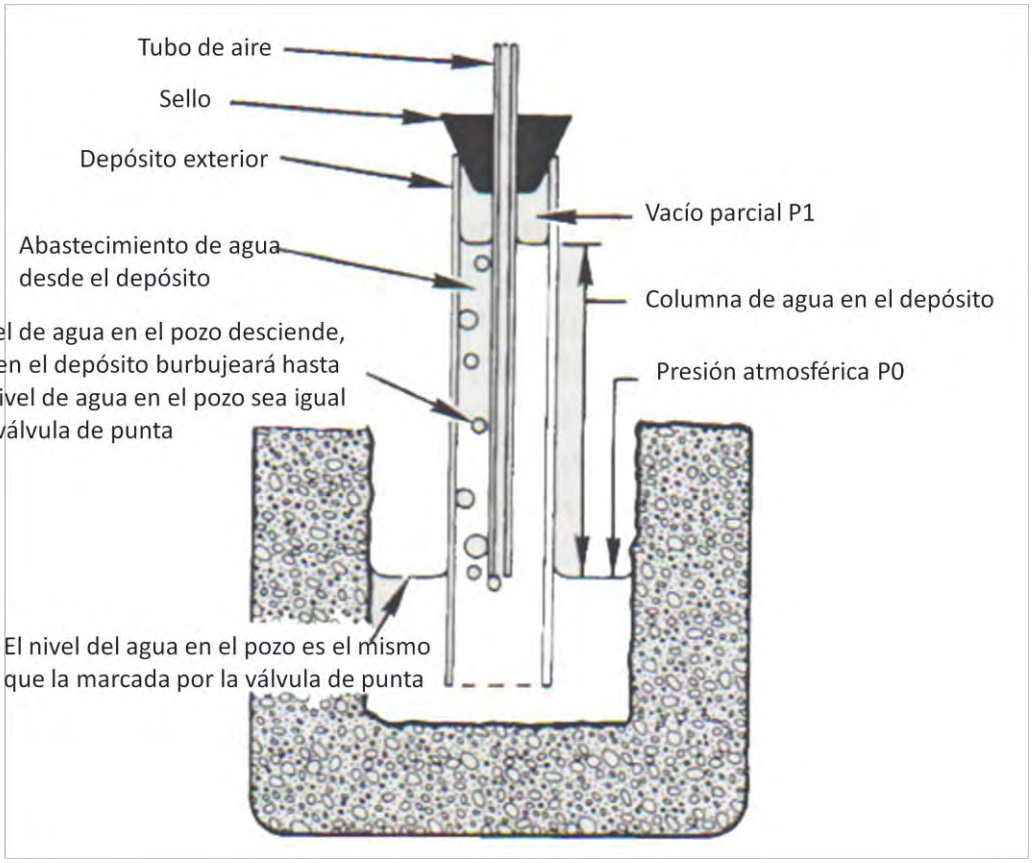
A.3. Permeámetro de Guelph

El permeámetro de Guelph es un aparato que opera mediante el principio del sifón de Mariotte mediante la aplicación de una carga constante. Con este aparato se mide la penetración a velocidad constante de agua en el suelo desde un pozo cilíndrico, en el cual se mantiene una carga constante. En el suelo se forma un bulbo de dimensiones que depende del tipo de suelo, radio del pozo y de la carga de agua en el pozo.

El permeámetro consta básicamente de dos tubos, uno que actúa como depósito de agua y otro de menores dimensiones que se pone en contacto con el suelo y lleva acoplado un sistema que permite mantener la carga hidráulica constante (tubo de Mariotte).

A continuación se describe dicho principio y los pasos recomendados para utilizar el permeámetro de Guelph y estimar la conductividad hidráulica del suelo a partir del manual que acompaña dicho aparato.

Figura A.7 Esquema de operación del permeámetro de Guelph



Modificado de Soil Mosture Equipment Corp

A.3.1. Modo de operación

El permeámetro de Guelph que emplea el principio de Mariotte. El método involucra la medición en estado estacionario de recarga de agua en un suelo no saturado desde una fosa cilíndrica, en el cual se mantiene una carga de agua constante (altura de agua en la excavación).

La carga constante en la excavación es establecida y mantenida a un nivel dado sobre el fondo, al regular la posición del tubo de aire que está ubicado al centro del permeámetro. Cuando el agua sale del depósito, se genera un vacío en la parte superior del recipiente. El vacío puede ser sólo neutralizado cuando entra aire en forma de burbujas desde la parte baja del dispositivo. Cuando el agua en el foso comienza a descender, comienzan a entrar burbujas por la parte baja del tubo del permeámetro. El vacío es entonces parcialmente aliviado al entrar aire al depósito y el volumen de agua en el foso es repuesto por el agua que sale del depósito. El tamaño y geometría del tubo de aire está diseñado para prevenir fluctuaciones en el nivel del agua en el pozo.

Una vez que el bulbo de humedad se ha establecido, la salida del agua del pozo llega a un estado estacionario. La razón de salida del agua, junto con el diámetro del pozo y la carga aplicada pueden ser utilizados para determinar la conductividad del medio, el potencial de flujo mátrico[103] y los parámetros $\alpha*$ y S del suelo.

A.3.1.1. Ecuaciones de análisis

El análisis de la descarga en estado estacionario desde un pozo cilíndrico en un suelo no saturado, se mide con ayuda del permeámetro de Guelph, tomando en cuenta las fuerzas que contribuyen al flujo tridimensional del agua en el suelo: la fuerza hidráulica que empuja el agua al suelo, la acción de la gravedad sobre el líquido en el fondo del pozo, la capilaridad en el medio adyacente.

A.3.1.2. Factor C

El factor C es una abstracción numérica de la forma del pozo, que depende del radio de la excavación y la carga H de agua en el pozo. A continuación se muestran las curvas para C en distintos tipos de suelo. La curva superior C1 es

[103] El potencial mátrico se debe a los mecanismos de retención del agua en el suelo. Su valor es siempre negativo, ya que la presión que origina se opone a la expulsión de agua edel suelo. Cuanto más seco está un terreno, más bajo es el potencial mátrico y mayor será la presión necesaria para extraer agua. Es equivalente a la presión capilar o potencial de succión.

utilizada para condiciones donde el parámetro $\alpha*$ es ≥ 0.12 cm−1, la curva intermedia C2 para $\alpha*$ = 0.04 cm−1 y la curva inferior, C3 para $\alpha*$ = 0.01 cm−1.

Los valores de C pueden ser tomados de la Figura A.8 o bien estimados con las siguientes ecuaciones:

$$C_1 = \left(\frac{H/a}{2.074 + 0.093(H/a)}\right)^{0.754}$$

$$C_2 = \left(\frac{H/a}{1.992 + 0.091(H/a)}\right)^{0.683}$$

$$C_3 = \left(\frac{H/a}{2.081 + 0.121(H/a)}\right)^{0.672}$$

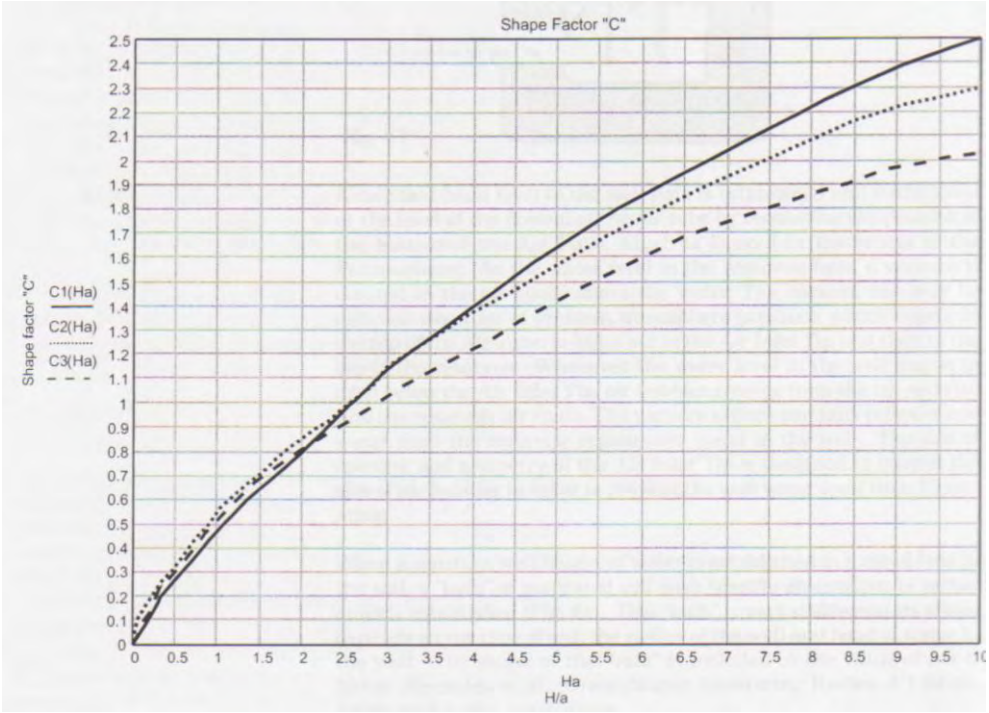
A.3.1.3. Análisis para una carga

$$K_{fs} = \frac{C_1 Q_1}{2\pi H_1^2 + \pi a^2 C_1 + 2\pi \frac{H_1}{\alpha^*}}$$

$$\phi_m = \frac{C_1 Q_1}{2(\pi H_1^2 + \pi a^2 C_1)\alpha^* + 2\pi H_1}$$

donde $\alpha*$ puede obtenerse de la Tabla A.7, con base en el análisis del sitio. Tómese en cuenta que Q_1 = XR1 o Y R1, dependiendo de si se utilizó la combinación de ambos depósitos (X) o sólo el interior (Y).

Figura A.8 Factor de forma C



Fuente: 2008K1 Instrucciones de uso, 2008.

Tabla A.7 Categorías de estructura y textura de suelos para la estimación del parámetro α

Textura de suelo – categoría de la estructura	**α* cm^{-1}**
Suelos compactados sin estructura, arcillas o limos, depósitos lacustres o sedimentos marinos	0.01
Suelos de textura fina (arcillas o limos) sin estructura, con posible contenido de arena	0.04
Suelos más estructurados desde arcillas hasta limos, también de estructura media como arenas finas. Esta categoría es más aplicable a suelos de cultivo.	0.12
Suelos de textura gruesa o con gravas, pueden incluir suelos altamente estructurados con grandes o numerosas fracturas, macroporos, etc.	0.36

Fuente: 2008K1 Instrucciones de uso, 2008.

A.3.1.4. Análisis para dos cargas

$$K_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1$$

$$G_1 = \frac{H_2 C_1}{\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_1 - H_2 C_1)}$$

$$G_2 = \frac{H_1 C_2}{\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_2 - H_2 C_1)}$$

nótese que: Q1 = XR1 o Y R1 y Q2 = XR2 o Y R2.

$$\phi_m = G_3 Q_1 - G_4 Q_2$$

Donde:

$$G_3 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C_2)C_1}{2\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_2 - H_2 C_1)}$$

$$G_4 = \frac{(2H_1^2 + a^2 C_1)C_2}{2\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_2 - H_2 C_1)}$$

$$\alpha = \frac{K_{fs}}{\phi_m}$$

Donde:

a - Radio del pozo, en cm.

C - Factor de forma del pozo, que depende la relación H/a .

C_1, C_2 - Factores C correspondientes a H1/a y H2/a respectivamente.

K - Conductividad hidráulica, en cm/s.

K_{fs} - Conductividad hidráulica de campo, con presencia de aire atrapado, en cm/s.

K(φ) - Relación de conductividad hidráulica entre presión ejercida para flujo en un medio no saturado.

R - Razón de descenso del agua en el depósito del permeámetro, en cm/min.

$\overline{R_1}$, $\overline{R_2}$ - Razones de descenso de agua correspondientes a las cargas H1 y H2, respectivamente, en cm/s.

S - Capacidad de absorción en cm/s.

α - Parámetro alfa, que relaciona la conductividad hidráulica y la presión de agua en el medio poroso, en cm−1

θ_1 - Contenido de agua inicial en el suelo, en cm3/cm3

θ_{fs} - Contenido de agua en el suelo para cuando se tiene aire presente en el medio, en cm3/cm3.

$\Delta\theta = (\theta_{fs} - \theta_i)$ - Diferencia entre los contenidos de agua inicial y saturado, en cm^3/cm^3.

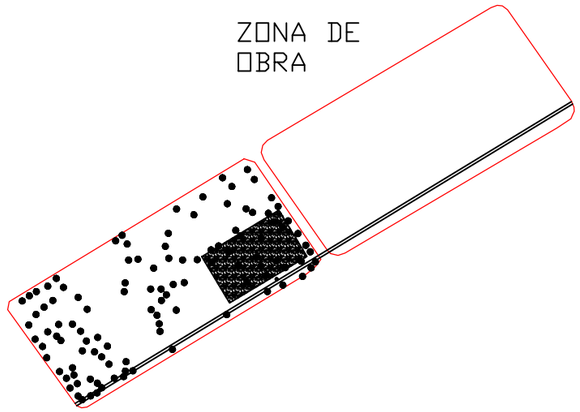
φm - Potencial de flujo mátrico, en cm^2/s.

φ - Presión de agua en el suelo, medida en cm de agua.

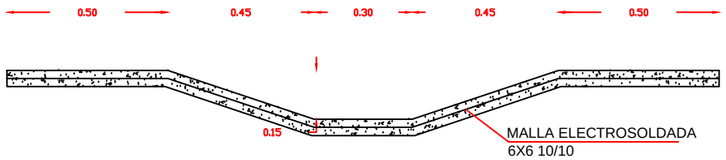
A.4. Planos

ZONAS DE INUNDACIÓN

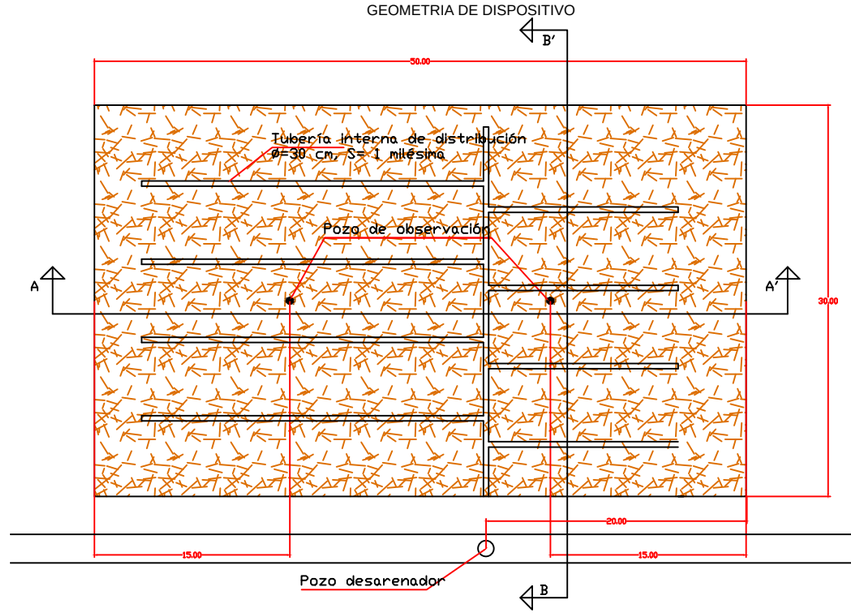
NUM.	ZONA	ZONA DE INUNDACION
1	ZONA REL CENTRAL CAMIONERA	BLVD. HILARIO MEDINA
2	BLVD. HIDALGO	BLVD. HIDALGO
3	GALERIA LAS TORRES	CALLE VASCO DE QUIROGA
4	CAMPO CURTIDORES	BLVD. DELTA
5	PROL. RIO MAYO Y CRUCIFIXION	PROLONGACION RIO MAYO
5	RIO MAYO Y CRUCIFIXION	PROLONGACION RIO MAYO
6	PUNTO VERDE	BLVD. PASEO DE JEREZ
7	PLAZA MAYOR	JUAN ALONSO DE TORRES
8	VALLE DEL CAMPESTRE	COLONIA VALLE DEL CAMPESTRE
9	VALLE DE ALBORADA	FRACC. VALLE DEL SOL
10	PLAZA DEL CAMPESTRE	BLVD. CLOUTHIER
11	LOS NARANJOS	LIBRAMIENTO MORELOS
12	EJIDO NUEVO LEON	VALLE DE SAN BERNARDO
13	IBERO	MORELOS Y V. VALTIERRA
14	DEPORTIVO LOYOLA	BLVD. LA LUZ
15	EYUPOL	COLONIA EYUPOL
16	ORQUIDEAS - JEREZ	COLONIA SAN ISIDRO
17	MARAVILLAS	COLONIA MARAVILLAS
18	LEON 1	LIBRAMIENTO MORELOS NTE.
19	LA LUZ	LIBRAMIENTO Y BLVD. LA LUZ
20	OLIMPICA	COLONIA LAS CRUCES
21	DELTA - JEREZ	FRACC. DELTA DE JEREZ
22	ATOTONILCO	VALLE DE SAN NICOLAS Y MAGUEY
24	JABORANDI	JARDINES DE JEREZ
25	CEMENTOS	COLONIA SAN JOSE DE CEMENTOS
26	T. LOZANO MARGARITAS	PASEO DEL MAUREL Y MARGARITAS
27	CONJUNTO MIGUEL HIDALGO	COLONIA U. HAB. MIGUEL HIDALGO
28	T. LOZANO SANTA RITA	COLONIA VALLE DE ALBORADA
29	T. LOZANO LA PISCINA	COLONIA MORELOS
30	RASTRO MPAL.	COLONIA CAMPO VERDE Y T. LANDA
31	PITAYO	COLONIA SAN JUAN BOSCO
32	LAS JOYAS	COLONIA CENTRO FAMILIAR LA PIEDAD
33	VADO TRANSPORTISTAS	COLONIA LA ESPERANZA
34	SANTA RITA	COLONIA VALLE DE ALBORADA
34	SANTA RITA	COLONIA VALLE DE ALBORADA
35	T. LANDA - LA PISCINA	BLVD. TORRES LANDA PTE.
36	LA PISCINA	BEVEDA ZODIACO LOMAS DE LA PISCINA
37	LOS OLIVOS	COLONIA LOS OLIVOS
38	CHAPALITA	COLONIA CHAPALITA
39	BLVD. M. ESCOBEDO ANDRADE	COLONIA TEPEYAC
40	BLVD. AEROPUERTO Y ASIS	RESID. EL CID SOBRE AV. ASIS
41	COLINA DE SAN ISIDRO	COLONIA COLINAS DE SAN ISIDRO
42	EL CARMEN	RESIDENCIAL EL CARMEN
43	BRISAS DEL CAMPO	BLVD. LA LUZ
43	BRISAS DE CAMPO	CLUB HIPICO LEON
44	PORTONES DEL CARMEN	PROLONGACION LA LUZ
44	PORTONES DEL CARMEN	BRISAS DE CAMPO SOBRE LA LUZ
45	TORRES LANDA SAN ISIDRO	GLEZ. B. NEGRA LOS FAISANES A SAN PEDRO
45	T. LANDA SAN ISIDRO	GLEZ. B NEGRA SAN ISIDRO
46	CIUDAD INDUSTRIAL	CENTRAL DE ABASTOS
47	VILLA MAGNA	QUINTA SAN LORENZO Y VILLA MAGNA IV SECC
48	ECHEVESTE	CD. AURORA Y PDAS. DE ECHEVESTE
49	ECHEVESTE	HACIENDAS DE ECHEVESTE
50	ECHEVESTE	HACIENDAS DE ECHEVESTE
51	MONTE DE PIEDAD	MIGUEL ALEMAN ZONA CENTRO
52	SOLEDAD	MIGUEL ALEMAN ZONA CENTRO
53	CENTRO EJE	BLVD. LOPEZ MATEOS ZONA CENTRO
54	PARQUE HIDALGO	PARQUE HIDALGO
55	GRAN PLAZA	COLONIA PENITAS
56	PABLO DEL RIO	COLONIA LOS PARAISOS
57	COLONIA ESPANA	COLONIA ESPANA
58	PILETAS	COLONIA SAN JOSE OBRERO
59	UNIVERSALIDAD CRISTIANA	ARROYO EL GRANIZO
59	LIBRAMIENTO MORELOS	PRADO HERMOSO
60	SORIANA MARAVILLAS	LIBRAMIENTO MORELOS



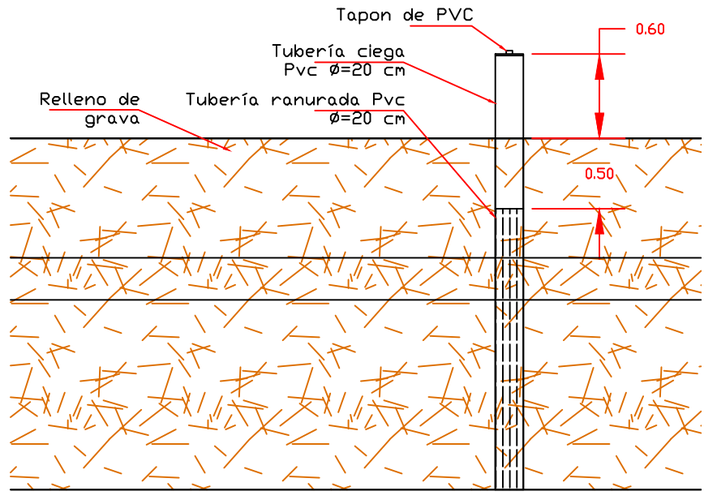
CANAL DE CONDUCCION



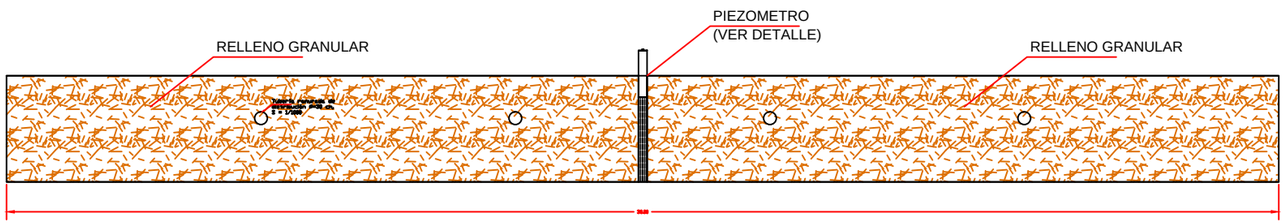
GEOMETRIA DE DISPOSITIVO



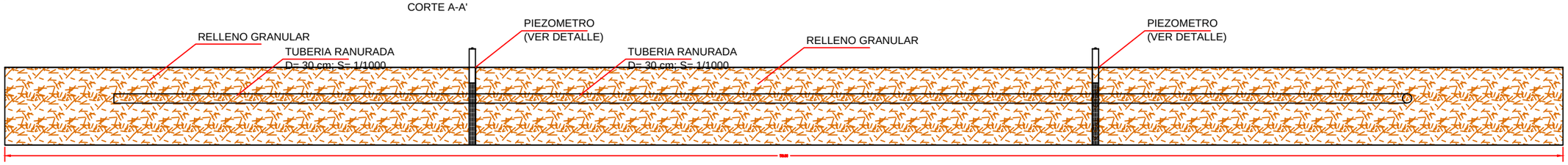
POZO DE OBSERVACION



CORTE B-B'



CORTE A-A'



UBICACION

SIMBOLOGIA

NOTAS:

PROYECTO

Anteproyecto de obra piloto para infiltracion de agua de lluvia, en Leon, Gto.

FACULTAD DE INGENIERIA

INSTITUTO DE GEOFISICA

DIBUJO: REVISO: AUTORIZO:

NOMBRE DE PLANO
ARREGLO GRAL.

Unidades: m

Escala S/E

Fecha Octubre-2010

CLAVE: ARR-01

No. 01

VALLE DEL CAMPESTRE

UNAM

Nota: Usar las marcas para doblar este plano impreso en tamaños x extremo.
Note: Use the folding marks to fold the drawings to Letter size, only when printed in 900mm x 600mm.
Doblar Aquí > < Fold Here!

Bibliografía

La ciencia es lo que sabes, la filosofía es lo que no sabes.

Bertrand Russell

- Aparicio, Francisco J. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Limusa. México, 1989.
- ASCE Ground water management: capability of extraction and recharge facilities: alternatives plans for groundwater management. Am. Soc. Civil Engineers: Manuals and Reports on Engineering Practice no. 40, 1972, Washington.
- Cartas topográficas. Escala 1:50,000. INEGI. F14C41, F14C42, F14C51 y F14C52
- Center for Watershed Protection Potential Stormwater Hotspots, Pollution Prevention, Groundwater Concerns and Related Issues. Minnessota, 2005.
- Chen Lung Chen, M., 1983. Rainfall Intensity-Duration-Frecuency. Journal of Hydraulic Engineering. 109, 12.5
- City of Portland Portland Stormwater Management Manual. Portland, 2004.
- CONAGUA Alcantarillado Pluvial. México, 2007.
- COREMI Potencial geohidrológico del Graben México, 2004.
- Cuaderno Estadístico Municipal. León, Gto. INEGI, 2004.
- Custodio, Emilio y Llamas, Ramón, Hidrología Subterránea, Editorial Omega, S.A. Barcelona 1976, 1◦ Edición.
- Department of Environmental Conservation of New York State Stormwater Management Design Manual. New York, 2010.
- DGCOH, Lesser y Asociados. Recarga artificial de agua residual tratada al acuífero del Valle de México. Ingeniería Hidráulica de México, mayo/agosto de 1991. p. 65-70.
- Escalante, C., y L. Reyes. 2002. Técnicas Estadísticas en Hidrología. Facultad de Ingeniería de la UNAM
- Georgia County. Georgia Stormwater Management Manual. Technical Handbook. USA, 2001.
- II Conteo de Población y Vivienda. INEGI, 2005.
- Ley de Aguas Nacionales. México, 1992.
- Maidment, D.R., Handbook of Hydrology, McGraw-Hill, 1993.
- Martínez-Reyes, J., 1992. Mapa geológico de la Sierra de Guanajuato con resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato; México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Serie de Cartas Geológicas y Mineras, 8, 1 mapa con texto.
- Martínez-Reyes, Juventino, 1987. Excursión a la Sierra de Guanajuato; parte 1. Resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato:

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre la geología de la región de la Sierra de Guanajuato, Guanajuato, Gto., Programa de resúmenes y guía de excursión, p. 50-70

- Martínez-Reyes, Juventino, 1987. Excursión a la Sierra de Guanajuato; parte 1. Resumen de la geología de la Sierra de Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Simposio sobre la geología de la región de la Sierra de Guanajuato
- Maryland Department of the Environment Maryland Stormwater Design Manual. Baltimore, 2000.
- NOM-003-CONAGUA-2007. Requisitos durante la construcción de pozos de extracción de agua para prevenir la contaminación de acuíferos.
- NOM-015-CONAGUA-2007 Infiltración artificial de agua a los acuíferos. Características y especificaciones de las obras y del agua.
- Oregon Association of CleanWater. Underground Injection Wells for Stormwater Columbia, 2003.
- Quintero, O., 1986. Geología de los alrededores de Comanja de Corona. Edo. de Jalisco. Proceedings Primer Symp. de Geología Regional de México. IG-UNAM, México.
- Salas, M. Angélica Caracterización hidrogeoquímica del agua subterránea de las principales fuentes de abastecimiento de la ciudad de León, Guanajuato, Facultad de Ingeniería, 2004.
- Salvato, Joseph Environmental Engineering and Sanitation. Wiley, New York, 1992. 4th Edition.
- Servais, M., Rojo-Yaniz, R. y Colorado-Lievano, D.; Estudios de las rocas básicas y ultra-básicas de Sinaloa y Guanajuato": Postulación de un paleo-golfo de Baja California y de una digitación Tethysiana en México Central. Geomimet. (3a época), (1981).
- Soil Moisture Equipment Corp. Guelph Permeameter 2800 K1. Operating Instructions Santa Barbara, Ca. 2008.
- Tarbuck, Edward J., Lutgens, Frederick K. Earth Science Prentice Hall. Sparks, N.V., 1991. 10th Edition.
- USEPA. Stormwater Technology Fact Sheet: Inltration Trench. Office of Water Washington, D.C. EPA 832-F-99-019 September - 1999
- Vasallo–Morales, L.F., Martínez–Reyes, J., Paris, J.P., 1996, Estructuras circulares y lineales en el Distrito Minero de Guanajuato, México, y su significado en la prospección minera: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 13(2), 252–257.

- Web de la Biblioteca de municipios: www.e-local.gob.mx
- Web de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Http://dgst.sct.gob.mx
- Web del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de León. www.sapal.gob.mx
- Weiss, L. L., 1964 Ratio of true xed-interval maximum rainfall. Journal of Hydraulics Division 90:77-82.