



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL-HIDRÁULICA

VULNERABILIDAD DE INUNDACIÓN EN LA LÍNEA A
DEL METRO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

CARLOS ALBERTO ROSAS CABELLO

TUTOR

DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA
INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX. SEPTIEMBRE, 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles

Secretario: Dr. Óscar Pozos Estrada

1^{er} Vocal: Dr. Adrián Pedrozo Acuña

2^{do} Vocal: Dra. Maritza Liliana Arganis Juárez

3^{er} Vocal: Dr. José Agustín Breña Naranjo

Lugar donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería de la UNAM, Ciudad de México.

Tutor de Tesis:

Dr. Adrián Pedrozo Acuña

Firma

Agradecimientos

“Lado seas, mi Señor, por la hermana agua,
la cual es muy útil y humilde y preciosa y casta.”
San Francisco de Asís

Este trabajo de investigación es el resultado de un esfuerzo compartido con un gran número de personas que, a través de su disposición, han apoyado y motivado a lograr mis metas. A todas y todos ellos, sin necesidad de especificarlos, saben que son un pilar irremplazable en mi caminar: familiares, amigos y compañeros.

Agradezco a la UNAM, el CONACyT y el Instituto de Ingeniería, por brindarme la oportunidad de desarrollar este trabajo y cursar los estudios de maestría. Así mismo, a la comunidad de investigadores y docentes del Programa de Posgrado en Ingeniería Civil, por la libertad con que compartieron su conocimiento y enseñanzas. En especial al Dr. Adrián Pedrozo, Dra. Maritza Arganis, Dr. Óscar Fuentes, Dr. Óscar Pozos, Dr. Agustín Breña; por su apoyo y aporte técnico para realizar este trabajo.

Resumen

El 4 de septiembre de 1969, el Sistema de Transporte Colectivo Metro inició formalmente con el servicio entre las estaciones Chapultepec y Zaragoza de la Línea 1. Los retos librados durante la construcción involucraron la derrama del conocimiento científico y técnico de la época; mostrando al mundo la modernidad del México de finales de los años 60. Cincuenta años después y con doce líneas en operación, el Metro sobrevive ante la falta de mantenimiento en su infraestructura, el retraso constante de los viajes y la afluencia desmedida por la sobrepoblación de la Zona Metropolitana del Valle de México. Aquejado por las características del suelo lacustre (*Figura 1.1*), el Metro ha experimentado los efectos de la sobreexplotación del acuífero en el desnivel de sus vías de rodamiento y, por si fuera poco, enfrenta los embates del cambio climático, con la inmersión de agua entre sus estaciones y vías. Sin lugar a dudas, dichos factores pueden agravarse ante la falta de mantenimiento, adaptación y renovación.

Las inundaciones que aquejan a la Ciudad de México no son una novedad, inclusive son parte de la historia remota de su cuenca. Sin embargo, sí existe conocimiento sobre la gravedad de los daños ocasionados a la población, sin obtener una solución que las disminuya. Por tanto, es necesario estudiar la vulnerabilidad al transporte más efectivo de la ciudad ante amenazas de inundación y sus pasajeros, principalmente por regresar las condiciones de eficiencia con las que se planeó. La bondad de su mínima contaminación lo hacen el transporte multimodal más utilizado a nivel mundial, en aras de disminuir los gases que repercuten en la climatología. Otra razón se debe a que millones de usuarios se trasladan utilizando el Metro en múltiples direcciones, dentro de una de las ciudades más pobladas del mundo.

Esta tesis implementa el uso de herramientas y materiales actuales para simular lluvias con distintos periodos de retorno. Propone una metodología capaz de determinar las zonas con mayor impacto a eventos hidrometeorológicos extremos en la Línea A, y utiliza software libre permitiendo a la comunidad científica reproducir el caso presentado bajo distintas condiciones. Además, simula una inundación registrada lo que propicia confiabilidad de la solución. Del presente estudio se generaron alternativas de mitigación, basadas en estudio previos y contextualizadas al entorno de la red. Los resultados aquí mostrados constituyen una posible solución a los distintos problemas que aquejan a la población y la infraestructura urbana.

Se espera que el análisis de la vulnerabilidad en la Línea A del Metro permita conocer la susceptibilidad de los medios de transporte al cambio climático, motive a estudios futuros e impulse un ánimo de resiliencia en el servicio del Metro, desde su modernización hasta su adaptación.

Abstract

On September 4th, 1969; the Mexico's City Metro formally began with the service on Line 1 between Chapultepec and Zaragoza stations. The challenges faced during construction involved the spilling of scientific and technical knowledge of the time; showing the world the modernity of Mexico at the end of the 60's. Fifty years later, with twelve lines in operation, the Metro survives due to the lack of maintenance in its infrastructure, the constant delay of trips and the excessive influx of overpopulation of the Metropolitan Zone of the Valley of Mexico. Covered by the characteristics of the lacustrine soil (Figure 1.1), the Metro has experienced the effects of the overexploitation of the aquifer on the bearing rolling tracks and, as if that were not enough, it faces the ravages of climate change, with the immersion of water between its stations and roads. Without a doubt, these factors can be aggravated by the lack of maintenance, adaptation and renovation.

The floods that afflict Mexico City aren't new, they are even part of the remote history of its basin. However, there is knowledge about the seriousness of the damage caused to the population, without obtaining a solution that reduces them. Therefore, it's necessary to study the vulnerability of the most effective transport of the city in the face of flood threats and its passengers, mainly by returning the conditions of efficiency with which it was planned. The goodness of its minimum pollution is made by the most used multimodal transport worldwide, in order to reduce the gases that have an impact on the weather. Another reason is because millions of users move using the Metro in multiple directions, within one of the most populated cities in the world.

This thesis implements the use of current tools and materials to simulate rainfall with different return periods. It proposes a methodology capable of determining the areas with the higher impact to extreme hydrometeorological events in Line A, and uses free software allowing the scientific community to reproduce the case presented under different conditions. In addition, it simulates a recorded flood which promotes reliability of the solution. From this study, mitigation alternatives were generated, based on previous studies and contextualized to the network environment. The results shown here constitute a possible solution to the different problems that afflict the population and urban infrastructure.

It is expected that the vulnerability analysis in Metro Line A will allow to know the susceptibility of the means of transport to climate change, motivate future studies and promote a spirit of resilience in the service of the Metro, from its modernization to its adaptation.

Contenido

Resumen	iv
Abstract	v
Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas	x
1 Introducción	2
1.1 Motivación	3
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivos específicos	4
2 Estado del Arte	5
2.1 Conceptos básicos	5
2.1.1 Riesgo, amenaza, vulnerabilidad y cambio climático	5
2.1.2 Clasificación de inundaciones	6
2.1.2.1 Por sus efectos	6
2.1.2.2 Por su origen	7
2.1.3 Estudios en zonas urbanas	8
2.1.3.1 Enfoque estadístico	9
2.1.3.2 Enfoque Multicriterio	9
2.1.3.3 Enfoque con percepción remota y GIS	9
2.1.3.4 Enfoque de Escenarios	10
2.1.4 Criterios para evaluación de riesgos	11
2.1.4.1 Criterio Francés	11
2.1.4.2 Criterio de EE.UU.	11
2.1.4.3 Criterio del Gobierno de Australia	12
2.1.4.4 Criterio IMTA	12
2.1.4.5 Criterio propuesto por el CENAPRED	13
2.2 Inundaciones en sistemas de transporte	13
2.2.1 Inundaciones históricas en metro	15
2.2.2 Estudio de inundaciones en sistemas de metro	17
3 Metodología	19
3.1 Modelo Hidrodinámico	20
3.1.1 Proceso	20
3.1.2 Información requerida	22
3.1.2.1 Ubicación y zona de estudio	22
3.1.2.2 Condiciones de frontera	22
3.1.2.3 Área de influencia	22
3.1.2.4 Tiempo de simulación	23
3.1.2.5 Información de precipitación	24
3.1.2.6 Modelo digital de elevación	24

3.1.2.7	Parámetros para cálculo de infiltración	25
3.1.2.8	Uso de suelo	25
3.1.3	Calibración y validación	25
3.2	Mapas de vulnerabilidad	27
3.2.1	Funcionamiento	27
3.2.2	Criterio de clasificación	27
4	Zona de estudio	29
4.1	Contexto de la Ciudad de México	29
4.1.1	Ubicación	29
4.1.2	Fisiografía y relieve	29
4.1.3	Geología	29
4.1.4	Edafología	29
4.1.5	Hidrología y clima	29
4.1.6	Hundimiento	31
4.1.7	Infraestructura de drenaje y problemas de inundación	32
4.2	El metro de la Ciudad de México	34
4.2.1	Descripción	34
4.2.2	Características	35
4.2.3	Afluencia	36
4.2.4	Índice de encharcamientos	37
4.3	Área de estudio	40
4.3.1	Descripción y ubicación	40
4.3.2	Características topográficas	40
4.3.3	Caracterización de suelo	43
4.3.3.1	Infiltración	43
4.3.3.2	Uso de suelo	44
4.3.4	Hidrología	45
4.3.4.1	Información de lluvia CENAPRED	47
4.3.4.2	Información de lluvia del Observatorio Hidrológico	48
4.3.5	Histórico de inundaciones en la zona	50
5	Resultados	54
5.1	Simulación Hidrodinámica	54
5.1.1	Calibración y validación	61
5.1.2	Discusión de resultados	65
5.2	Mapas de vulnerabilidad	65
5.3	Propuesta de mitigación	72
6	Conclusiones	76
	Referencias	78
	Anexo	84

Lista de Figuras

<i>Figura 1.1</i>	<i>Red del S.T.C Metro de la Ciudad de México y antigua zona de lagos</i>	1
<i>Figura 2.1.1</i>	<i>Riesgo y efectos del cambio climático</i>	6
<i>Figura 2.1.2</i>	<i>Metodología multicriterio</i>	10
<i>Figura 2.1.3</i>	<i>Metodología enfoque Percepción Remota y GIS</i>	10
<i>Figura 2.2.1</i>	<i>Clasificación de intermitencias en sistemas de transporte</i>	15
<i>Figura 2.2.2</i>	<i>Inundación en el metro de Fukuoka</i>	16
<i>Figura 2.2.3</i>	<i>Inundación en el metro de Nueva York</i>	16
<i>Figura 2.2.4</i>	<i>Inundación en el metro de Guangzhou</i>	17
<i>Figura 3.1.1</i>	<i>Metodología general de estudio</i>	19
<i>Figura 3.1.2</i>	<i>Fronteras en zona de estudio</i>	22
<i>Figura 3.1.3</i>	<i>Esquema de la ecuación de Peck</i>	23
<i>Figura 3.2.1</i>	<i>Metodología de InaSAFE</i>	28
<i>Figura 4.1.1</i>	<i>Distribución temporal de la precipitación media y máxima en la ZMVM</i>	31
<i>Figura 4.1.2</i>	<i>Deformaciones diferenciales en la Línea A del S.T.C. Metro</i>	32
<i>Figura 4.2.1</i>	<i>Abastecimiento de energía del S.T.C. Metro</i>	35
<i>Figura 4.2.2</i>	<i>Afluencia por estación 2018</i>	37
<i>Figura 4.2.3</i>	<i>Esquema de drenaje pluvial y freático en el Metro</i>	38
<i>Figura 4.2.4</i>	<i>Rejillas de ventilación a nivel superficial</i>	38
<i>Figura 4.2.5</i>	<i>Afectaciones por inundaciones en estaciones</i>	38
<i>Figura 4.2.6</i>	<i>Infografía por Temporada de Lluvias en el Metro 2019</i>	39
<i>Figura 4.3.1</i>	<i>Perfil de Terreno a lo largo de la Línea A</i>	40
<i>Figura 4.3.2</i>	<i>Ubicación de Línea A</i>	41
<i>Figura 4.3.3</i>	<i>Hundimiento en zona de estudio</i>	42
<i>Figura 4.3.4</i>	<i>DEM con resolución y curvas de nivel a 5m</i>	43
<i>Figura 4.3.5</i>	<i>Análisis de suelo en zona de estudio</i>	44
<i>Figura 4.3.6</i>	<i>Uso de suelo en la zona</i>	45
<i>Figura 4.3.7</i>	<i>Flujo acumulado</i>	46
<i>Figura 4.3.8</i>	<i>Vista de la Estación La Paz desde el Canal de la Compañía</i>	46
<i>Figura 4.3.9</i>	<i>Ubicación de estaciones climatológicas en zona de estudio</i>	47
<i>Figura 4.3.10</i>	<i>Hietogramas de precipitación máxima de diseño para diferentes periodos de retorno</i>	48
<i>Figura 4.3.11</i>	<i>Ubicación de estaciones OH en zona de estudio</i>	49
<i>Figura 4.3.12</i>	<i>Hietograma de precipitación máxima para el 14 de junio de 2018</i>	49
<i>Figura 4.3.13</i>	<i>Inundación en acceso al Puente La Concordia</i>	51

<i>Figura 4.3.14</i>	<i>Registro de lluvia 14 junio 2018 a) Intensidad de precipitación b) Precipitación acumulada</i>	53
<i>Figura 4.3.15</i>	<i>Ubicación de encharcamientos Calz. Ignacio Zaragoza</i>	53
<i>Figura 5.1.1</i>	<i>Tirante máximo para Tr 2 años</i>	54
<i>Figura 5.1.2</i>	<i>Tirante máximo para Tr 5 años</i>	56
<i>Figura 5.1.3</i>	<i>Tirante máximo para Tr 10 años</i>	57
<i>Figura 5.1.4</i>	<i>Tirante máximo para Tr 50 años</i>	58
<i>Figura 5.1.5</i>	<i>Tirante máximo para Tr 100 años</i>	59
<i>Figura 5.1.6</i>	<i>Tirante máximo para la lluvia del 14 de junio 2018</i>	60
<i>Figura 5.1.7</i>	<i>Puntos medidos 14 junio 2018</i>	61
<i>Figura 5.1.8</i>	<i>Comparativo de tirantes respecto al medido</i>	63
<i>Figura 5.1.9</i>	<i>Error relativo entre tirantes</i>	64
<i>Figura 5.2.1</i>	<i>Vulnerabilidad en la zona para Tr 2 años</i>	67
<i>Figura 5.2.2</i>	<i>Vulnerabilidad en la zona para Tr 5 años</i>	68
<i>Figura 5.2.3</i>	<i>Vulnerabilidad en la zona para Tr 10 años</i>	69
<i>Figura 5.2.4</i>	<i>Vulnerabilidad en la zona para Tr 50 años</i>	70
<i>Figura 5.2.5</i>	<i>Vulnerabilidad en la zona para Tr 100 años</i>	71
<i>Figura 5.3.1</i>	<i>Propuesta de alerta de lluvia e inundación</i>	73
<i>Figura 5.3.2</i>	<i>a) Propuesta Interestación Los Reyes-Santa Marta b) Falla</i>	74
<i>Figura 5.3.3</i>	<i>a) Propuesta en acceso a la estación Acatitla b) Falla</i>	74
<i>Figura 5.3.4</i>	<i>a) Propuesta de cubierta de orificios b) Falla</i>	74
<i>Figura 5.3.5</i>	<i>a) Propuesta en la estación Pantitlán b) Estado normal en el interior c) Falla</i>	75
<i>A.1</i>	<i>Nomograma de riesgo de inundación criterio OFEE</i>	84
<i>A.2</i>	<i>Nomograma de riesgo de inundación criterio FEMA</i>	84
<i>A.3</i>	<i>Nomograma de riesgo de inundación criterio NSW</i>	85
<i>A.4</i>	<i>Nomograma práctico de riesgo de inundación criterio NSW</i>	85
<i>A.5</i>	<i>Estaciones Climatológicas en Ciudad de México</i>	86
<i>A.6</i>	<i>Precipitación espacial máxima en 100 años para Ciudad de México</i>	87
<i>A.7</i>	<i>Estaciones OH y DEM de terreno</i>	88
<i>A.8</i>	<i>Uso de suelo en Ciudad de México</i>	89
<i>A.9</i>	<i>Hundimiento anual de la Ciudad de México</i>	90
<i>A.10</i>	<i>Encharcamientos cercanos a estaciones del Metro 2016</i>	91
<i>A.11</i>	<i>Encharcamientos cercanos a estaciones del Metro 2017</i>	92
<i>A.12</i>	<i>Encharcamientos cercanos a estaciones del Metro 2018</i>	93

Lista de Tablas

<i>Tabla 2.1</i>	<i>Tipo de precipitación</i>	7
<i>Tabla 2.2</i>	<i>Criterio OFEE</i>	11
<i>Tabla 2.3</i>	<i>Criterio FEMA</i>	12
<i>Tabla 2.4</i>	<i>Criterio de New South Wales</i>	12
<i>Tabla 2.5 a</i>	<i>Criterio tirante IMTA</i>	13
<i>Tabla 2.5 b</i>	<i>Criterio volcamiento y deslizamiento IMTA</i>	13
<i>Tabla 2.6</i>	<i>Criterio de severidad de inundación</i>	13
<i>Tabla 2.7</i>	<i>Comparación de investigaciones y enfoques en redes de metro</i>	18
<i>Tabla 3.1</i>	<i>Información de entrada en modelo Itzi</i>	21
<i>Tabla 3.2</i>	<i>Información de salida en modelo Itzi</i>	21
<i>Tabla 3.3</i>	<i>Código en fronteras</i>	22
<i>Tabla 3.4</i>	<i>Valores n Manning</i>	25
<i>Tabla 3.5</i>	<i>Contingencias en un modelo</i>	26
<i>Tabla 4.1</i>	<i>Infraestructura de drenaje</i>	33
<i>Tabla 4.2</i>	<i>Semáforo de lluvia</i>	34
<i>Tabla 4.3</i>	<i>Descripción de la red del Metro de la Ciudad de México</i>	35
<i>Tabla 4.4</i>	<i>Afluencia en el Metro de la Ciudad de México</i>	36
<i>Tabla 4.5</i>	<i>Reportes de encharcamientos próximos</i>	39
<i>Tabla 4.6</i>	<i>Parámetros de infiltración Green-Ampt</i>	44
<i>Tabla 4.7</i>	<i>n Manning</i>	45
<i>Tabla 4.8</i>	<i>Detalle de estaciones climatológicas</i>	47
<i>Tabla 4.9</i>	<i>Registro histórico de la Línea A y alrededores</i>	50
<i>Tabla 4.10</i>	<i>Registro de tirantes cercanos a Línea A</i>	52
<i>Tabla 4.11</i>	<i>Clasificación de recurrencia e encharcamientos</i>	52
<i>Tabla 5.1</i>	<i>Parámetros Itzi</i>	54
<i>Tabla 5.2</i>	<i>Características de información</i>	54
<i>Tabla 5.3</i>	<i>Tirantes calculados para distintos periodos de retorno</i>	62
<i>Tabla 5.4</i>	<i>Número de celdas para Tr 2 años</i>	64
<i>Tabla 5.5</i>	<i>Métricas en distintos periodos de retorno</i>	64
<i>Tabla 5.6</i>	<i>Vulnerabilidad de inundación por estación</i>	65
<i>Tabla 5.7</i>	<i>Clasificación de Tirante</i>	65
<i>Tabla 5.8</i>	<i>Periodos de retorno para avenidas de diseño en diferentes obras de protección</i>	72

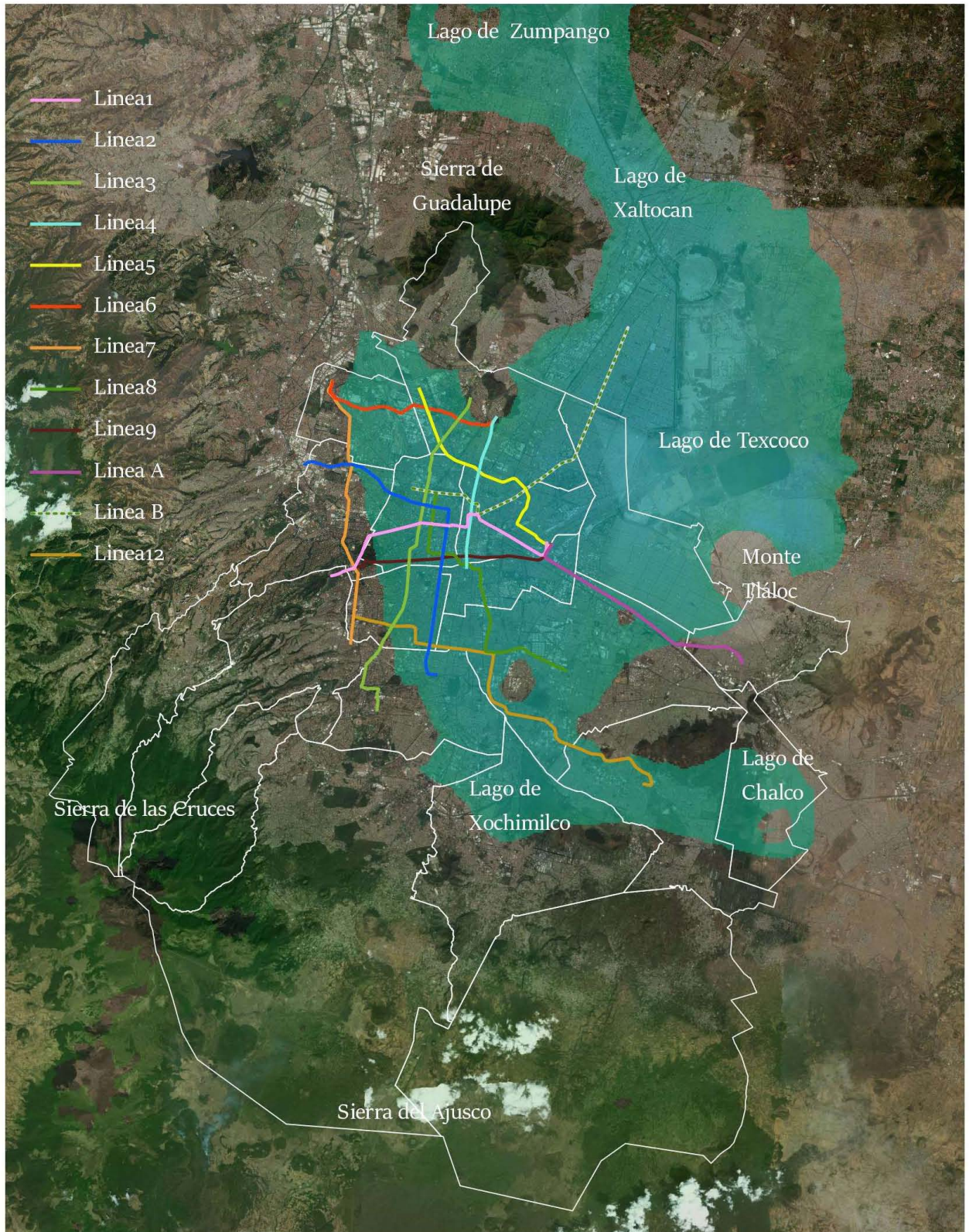


Figura 1.1 Red del S.T.C.
 Metro de la Ciudad de México y antigua zona de lagos

Capítulo 1

Introducción



En el mundo, entre 1997 y 2016 murieron alrededor de 524,000 personas a causa de las sequías e inundaciones (Eckstein et al., 2018); cuyas pérdidas económicas directas generadas por tales efectos, ascendieron hasta en 2.9 billones de dólares. Los reportes estiman que los países principalmente afectados fueron Estados Unidos, China y Japón (ONU,2018).

Por la devastación e impactos que ocasionan, las inundaciones son consideradas uno de los desastres naturales de mayor peligro; aumentadas por el cambio climático (Hirabayashi et al.,2013) y provocando daños comúnmente en áreas urbanas. La insuficiencia del drenaje, el desbordamiento de cauces y la baja capacidad de infiltración del suelo -por la desmedida urbanización - propician caos en la población y daños en la infraestructura, ante lluvias intensas.

La comunidad científica ha alertado en últimas fechas de la presencia fehaciente del cambio climático; que se explica por la emisión exagerada de gases contaminantes, en algún grado por la expansión de manchas urbanas y aumento poblacional¹(UNFPA,2019). Hacer frente al cambio en los patrones climáticos, involucra medidas ecosustentables como la reutilización de materiales, disminución en el consumo de plásticos y movilidad urbana mediante transporte masivo (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, 2000; Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico / Agencia Internacional de Energía, 2000). Sin embargo, al producirse una inundación urbana, las afectaciones pueden derivarse en obstáculos (Jenelius y Mattsson, 2015); limitando la circulación vial, interrupción y operación de viajes en los sistemas de transporte terrestre. Consecuentemente, resulta un problema de seguridad la inundación urbana para los transportes confinados, puesto que ante una inundación súbita; el transporte es vulnerable a quedar sumergido y los usuarios a una alta exposición de ahogamiento; sin contar las altas pérdidas económicas directas e indirectas para los gobiernos locales.

Así pues, afrontar los eventos hidrometeorológicos extremos a partir de planes de mitigación (Büchle et al., 2006), el reconocimiento de la susceptibilidad en una red transporte a estos efectos con la construcción de mapas de vulnerabilidad y riesgo; brindarán la información necesaria para tomar las decisiones pertinentes, evaluar y cuantificar daños, emitir alertas y adaptar la infraestructura. Sin dejar de lado la necesaria conservación de áreas verdes, el cuidado y reúso del agua y la procuración de actividades proambientales, transformarán las ciudades en entidades resilientes.

¹ De acuerdo a estadísticas de Naciones Unidas, la población mundial rebasa los 7,300 millones de personas (UNFPA, 2015), que representa un crecimiento del 38% en 25 años. Así mismo, según datos y proyecciones del Banco Mundial, las ciudades albergarán el 59% con 5000 millones de personas en 2030.

1.1 Motivación

Al año 2015, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) tenía más de 20 millones de habitantes, cifra que equivalió al 17% de la población nacional. Esto se traduce en que, poco menos de la mitad de la población de la zona metropolitana, vive dentro de la Ciudad de México (OCDE, 2015). Según Almejo (Almejo y Téllez, 2015) en 2010, el área circundante a la Ciudad de México - municipios de Ecatepec, Tlalnepantla, Nezahualcóyotl, etc.- creció más del 30% a partir del año 2000, a la fecha de estudio. Los datos demuestran que el crecimiento de la mancha urbana demanda servicios, cambio de uso de suelo e infraestructura de movilidad para cubrir alrededor de 34.6 millones de viajes al día, de los cuales 16.6 millones lo realiza en algún medio de transporte y el 19 % por medio del Sistema de Transporte Colectivo Metro (Guzmán, Lozano y Miranda, 2018); las causas principalmente están vinculadas a oportunidades de empleo y estudio.

Aun cuando la sobrepoblación es un factor determinante para la reestructuración constante de la ciudad, el problema de hundimiento del suelo produce malestar en sus habitantes, además de que, durante la temporada de lluvias, las afectaciones por inundaciones urbanas son un problema cotidiano, de acuerdo a cuatro factores principales: (1) Características hidrogeológicas, (2) Sobrepoblación (3) Cambio de uso de suelo y (4) Estado del drenaje. El daño causado al sistema de transporte suele ser aislado, sin embargo; por la interrupción en el servicio, los costos indirectos tienden a aumentar sin conocerse una estimación real (Domínguez, 2000).

Desde la perspectiva del daño que se causa al sistema de transporte urbano por eventos extremos, los estudios son limitados, con poca información sobre los efectos negativos que los impactan (Suárez, 2005).

1.2 Justificación

A razón de que las inundaciones en sistemas de transporte son eventos que originan caos en la movilidad y obstrucción de vialidades; examinarlos representa la disminución de costos por eventualidad extremas, porque se trata del segundo sistema de transporte masivo más importante de la ciudad, la reducción del tiempo de traslado, afluencia y la mejor relación costo-beneficio. El estudio de la exposición del metro a inundaciones, la vulnerabilidad de sus estaciones y los alrededores; propician el conocimiento necesario para construir planes estratégicos de mitigación, el mantenimiento de la infraestructura de drenaje y la adecuación o construcción de infraestructura nueva.

El cambio de uso de suelo y la sobrecarga de la red de drenaje, producto de la precipitación y escurrimiento, producen aumento de niveles llegando a encharcamientos severos o inundaciones. Tales eventos, ponen en riesgo la infraestructura vial, problemas a la red de transporte público y demoras en viajes. Con la aplicación de metodologías específicas, aplicadas en una red de transporte masivo, reproducirá la interacción flujo superficial para eventos que ocasionan inundaciones. Como resultado, esta metodología propondrá la delimitación y ubicación de puntos vulnerables.

1.3 Objetivos

El objetivo de este trabajo, pretende construir una metodología para elaborar mapas de vulnerabilidad en la Línea A del Sistema de Transporte Colectivo Metro, por inundaciones pluviales. Definirá la zona de estudio y simulará hidrodinámicamente para periodos de retorno de 2,5,10, 50 y 100 años como el caso más desfavorable. Contempla la evaluación del evento del 14 de junio de 2018, que ayudará en la calibración del modelo y la propuesta de soluciones alternativas para proteger a los pasajeros.

1.3.1 Objetivos específicos

- 1.- Caracterizar y generar los tirantes de agua en la zona de estudio.
- 2.- Alcanzar una calibración adecuada del modelo.
- 3.- Generar un mapa de vulnerabilidad en la zona.
- 4.- Proponer algunas medidas de mitigación.

Capítulo 2



Canal de San Juan (Acalohtli)
“Acalli canoa; ohtli camino”

Estado del Arte

Los sistemas de transporte bien planificados, tienden a reducir la expansión urbana, salvando paisajes y protegiendo la biodiversidad (Bobylev, 2009; Sterling et al., 2012); proporcionan transporte seguro y eficiente, disminuyen la necesidad y uso de automóviles; reducen la congestión, tiempos de viaje y la emisión de gases contaminantes (Besner, 2002). Durante las últimas décadas, los desastres por inundaciones han provocado enormes pérdidas económicas y funcionalidad en muchas ciudades (Chen et al., 2013). Estos eventos demuestran la necesidad urgente de investigación en dicha materia, para prevenir y disminuir daños. La sostenibilidad a largo plazo de las áreas urbanas es beneficiada por la disponibilidad de sistemas de transporte subterráneo. Ciudades como Singapur han mejorado la calidad de viaje y urbanización; a partir del manejo de planes maestros y mitigación, diseñados en torno a los sistemas de transporte (Hulme y Zhao, 1999).

2.1 Conceptos básicos

2.1.1 Riesgo, peligro, vulnerabilidad y cambio climático

En la literatura la definición de riesgo, amenaza y vulnerabilidad tiende a ser confuso si no se considera el enfoque deseado, las causas y su aplicación. En lo que respecta a las causas, una amenaza es un fenómeno que puede causar la pérdida de vidas, lesiones o impactos sociales, económicos y ambientales. Por ejemplo, los eventos hidrometeorológicos extremos generados por elementos atmosféricos como: ciclones tropicales, lluvias intensas; tormentas de nieve y granizo; heladas, sequías, ondas de calor y gélidas (LGPC, 2017).

La exposición se refiere a la ubicación de personas, infraestructura y vivienda en áreas propensas a las amenazas, pudiendo ser afectado negativamente. En tanto la vulnerabilidad es la susceptibilidad ante amenazas expresado por el grado de pérdidas posibles (UNDDR, 2017). En términos generales pueden distinguirse dos tipos: vulnerabilidad física y vulnerabilidad social. La vulnerabilidad física es la probabilidad de daño en un sistema expuesto; a través de una función matemática o matriz de vulnerabilidad con valores entre cero y uno (ANRI, 2014). La vulnerabilidad social es una medida de la incapacidad de grupos humanos, personas o sociedades a resistir impactos o amenazas. La vulnerabilidad física de las poblaciones urbanas tiende a aumentar, con la concentración de infraestructura y el entorno en áreas urbanas (Ouma, et al., 2014). Sin embargo, la vulnerabilidad es el componente más importante del riesgo, pues determina si la exposición a un peligro. De esta manera, el riesgo se expresa como función:

$$Riesgo = f(Peligro, Vulnerabilidad, Exposición) \quad (1)$$

Tradicionalmente el riesgo por inundación urbana se ha determinado integralmente como la interacción entre el peligro (según la amenaza), exposición y vulnerabilidad. Sin embargo, con urbanización y cambio climático, el riesgo de inundación ha mostrado algunas características

nuevas (Xu et al., 2018). El cambio climático provoca un aumento en la intensidad y frecuencia del peligro. La rápida urbanización, donde se incluye la expansión de la población y la construcción de infraestructura urbana; agrava la exposición y la vulnerabilidad de la infraestructura (Quan, 2014). Así, de manera esquemática (Figura 2.1.1); existe un crecimiento del riesgo, vulnerabilidad y exposición a partir de los efectos del cambio climático y urbanización.

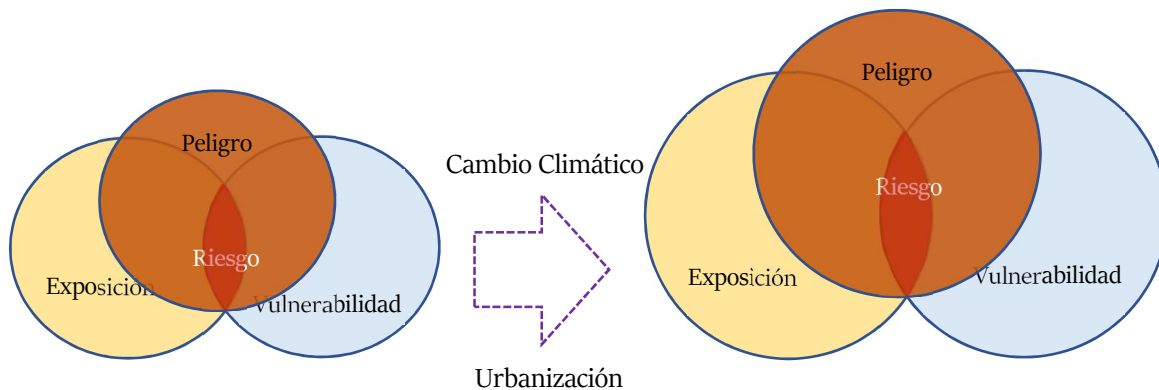


Figura 2.1.1 Riesgo y efectos del cambio climático.

Fuente: Adaptación de Lyu et al., 2019.

En resumen, el riesgo por inundación se refiere a un desastre potencial relacionado con inundaciones que involucran pérdidas en vidas, estado de salud, infraestructura y servicios (Gallina et al., 2016); por lo que los eventos hidrometeorológicos extremos como agentes perturbadores, son considerados una amenaza principal en la cuantificación de riesgos de inundación. Un peligro no representa ningún riesgo si no hay exposición al cuerpo del desastre (Lyu et al., 2018).

2.1.2 Clasificación de inundaciones

Las inundaciones se clasifican según su origen (Arganis, M., Domínguez, R., et al., 2010; Rodríguez, H., 2013) en cuatro principalmente: pluviales, fluviales, costeras y por fallas en infraestructura; por sus efectos en inundaciones lentas y rápidas.

2.1.2.1 Por sus efectos

Las inundaciones lentas son ocasionadas por la falta de respuesta hidrológica en las cuencas a causa de niveles con poca pendiente, favoreciendo el estancamiento del agua y alta concentración vegetal; lo que evita el flujo. Debido al proceso en la cuenca, las inundaciones lentas son consideradas de bajo riesgo porque difícilmente causan pérdidas mortales. En caso contrario, las inundaciones rápidas son la principal causa de muerte. El tiempo de ocurrencia de una inundación rápida es impredecible y no permite desalojar a la población. Se considera que la mayoría de inundaciones rápidas se presentan en llanuras de inundación -en las márgenes de los ríos- donde la cuenca responde y la baja permeabilidad del suelo, propicia daños ante una avenida repentina.

2.1.2.2 Por su origen

Inundaciones pluviales

Las inundaciones pluviales se originan por la falta de respuesta de la cuenca para drenar alta intensidad de precipitación sobre suelo saturado o poco permeable en áreas urbanas, acumulándose por horas o días. Otro factor en áreas urbanas es la deficiencia en la red de drenaje y los cambios de uso de suelo. Se pueden establecer cuatro tipos de precipitación (ver *Tabla 2.1*).

Tabla 2.1 Tipos de precipitación

Tipo	Características
Ciclones Tropicales	Las lluvias son el resultado de interacciones de sistemas de baja presión atmosférica en los trópicos, de forma temporal, comprendidos entre los meses de mayo a noviembre.
Lluvias invernales	La interacción de masas de aire frío proveniente de los polos y el aire cálido en las costas, provoca lluvias intensas. Estas lluvias se presentan estacionalmente y suceden a los ciclones tropicales.
Lluvias orográficas	El choque de aire húmedo con altas elevaciones ocasiona lluvias locales en zonas montañosas.
Lluvias convectivas	Por lo regular se presentan en llanuras, producto de la elevación de aire cálido-húmedo, generando lluvias locales intensas.

Inundaciones fluviales

Se considera inundación fluvial al desbordamiento de cauces naturales o artificiales, regularmente en áreas cercanas -llanuras de inundación-. La generación del desbordamiento de los cauces puede deberse a distintas causas, principalmente por la respuesta de la cuenca en sus tributarios ante precipitaciones aguas arriba, la tala inmoderada y el cambio de suelo. Las afectaciones por inundaciones fluviales pueden ser graves debido al gasto y la velocidad del flujo.

Inundaciones costeras

Las inundaciones surgen por la intrusión del mar a las costas, y en ocasiones, la interacción con la desembocadura de ríos o lagos cercanos. El aumento en el nivel del mar a consecuencia de los ciclones tropicales, o los efectos de maremotos por la actividad sísmica, produce inundaciones de alta peligrosidad en zonas urbanas adyacentes.

Inundaciones por fallas en estructuras hidráulicas

Las inundaciones aguas abajo por la falla en diques, terraplenes de contención, tuberías y presas; pueden ser graves, toda vez que el mantenimiento y la ejecución de planes de seguridad sean llevados a cabo. La probabilidad de falla en estructuras de contención hídrica no puede ser desestimadas, sobre todo cuando el aumento en las precipitaciones y la correcta operación de compuertas, no son consideradas adecuadamente.

2.1.3 Estudios de inundación en zonas urbanas

La problemática de inundaciones en áreas urbanas es recurrente, debido a la carencia de programas de mitigación, predisposición del entorno y la falta de un manejo adecuado de las

lluvias y cauces. En ese sentido, los daños causados pueden ser severos primordialmente en las vías de comunicación, fauna, infraestructura e incluso la pérdida de vidas humanas (Rodríguez et al. 2014). Los estudios recientes han determinado una necesidad urgente por comprender el riesgo de inundación en las ciudades, bajo el análisis de fuente-estado-respuesta. De acuerdo a Alcocer-Yamanaka et al. (2012), un programa de manejo de precipitaciones considera que la lluvia es una causa principal de inundación urbana² (DETR,2000); por lo que su análisis puede realizarse mediante una metodología de cuatro fases:

1. Identificación de la causa que genera inundaciones.
 - Filtraciones de agua freática en los colectores
 - Lluvias extraordinarias
2. Análisis hidráulico-hidrológico de la zona de estudio.
 - Identificación de lluvias que generan inundaciones
 - Generación de curvas Precipitación-Duración-Periodo de retorno para el dimensionamiento de nuevas obras
 - Configuración de las cuencas y microcuencas de la zona de estudio
 - Identificación de los usos de suelo
3. Selección adecuada de herramientas de cálculo para la generación de un modelo de simulación.
 - Modelo Digital de elevaciones
 - GIS con los datos de colectores principales, lluvias, usos de suelo, etc.
 - Creación del modelo de simulación de microcuencas colectores y drenes pluviales
 - Construcción del modelo de simulación de escurrimiento en las calles para la generación de mapas de riesgo
4. Análisis de escenarios de inundación para diferentes periodos de retorno, presentando posibles soluciones que permitan mitigar los problemas de inundación.
 - Generación de mapas de inundación para diferentes lluvias
 - Evaluación de costos generado por los defectos de la inundación
 - Costos de implementar acciones estructurales y no estructurales para disminuir los riesgos de inundación

Esta metodología caracteriza integralmente una zona de alta vulnerabilidad y riesgo de inundación, con información de costos y desglose por categorías (*ver inciso 2.1.4*); permitiendo vislumbrar la problemática en un panorama local. Sin embargo, otro aspecto reside en la filosofía y enfoque de estudio, que considera la información recopilada, objetivos y contribuciones. En ese sentido, es importante revisar bajo que enfoque se planea revisar un evento de inundación; ya sea por estadísticas, multicriterios, imágenes o percepción remota y en su caso la ejecución de escenarios posibles, según la zona de estudio lo permita.

2.1.3.1 Enfoque Estadístico

Se basa en registros de inundaciones históricas y análisis de tendencias. Werritty (2002) aplicó escenarios con cambio climático para identificar los problemas de los recursos hídricos. Nott

² Que cambia en tiempo y espacio

(2006) propuso que los registros históricos de inundaciones son una referencia útil para la evaluación del riesgo de inundaciones.

2.1.3.2 Enfoque Multicriterio

El análisis con criterios múltiples se apoya en la evaluación cualitativa mediante un sistema de índices y pesos. Se caracteriza por introducir capas en un procesador de información. La mayoría toma datos como lluvia, topografía, drenaje y uso de suelo. Steuer y Na (2003) apoyados en estadísticas y categorías, exploraron la aplicación de tecnologías y herramientas de decisión para evaluar el riesgo. En 2007 Hajkowicz y Collins introdujeron la comparación y análisis de conjuntos para un plan estratégico de infraestructura. Wang, Zhao y Hao (2011) crearon un modelo de decisión basado en la teoría de conjuntos difusos variables. Usaron comparación dual con criterios cualitativos y cuantitativos integrando preferencias subjetivas e iterativas. Ouma y Tateishi en 2014 obtuvieron mapas de vulnerabilidad y riesgo para inundaciones urbanas, a partir del Proceso de Jerarquía Analítica Difusa (FAHP) y GIS³. Así mismo, con la herramienta de decisión en el proceso de jerarquización (Schoenherr, 2008) introdujeron pesos en cada criterio según la importancia y características de la zona de estudio. La mayoría de este enfoque tiende a un procesamiento común, descrito en el diagrama de la *Figura 2.1.2*. Se resalta en el estudio de Ouma la aplicación de dos criterios: vulnerabilidad física y vulnerabilidad socioeconómica, determinando un estudio integral de vulnerabilidad como se explica en la sección 2.1.1 de este capítulo, tomado en cuenta para la investigación.

2.1.3.3 Enfoque con Percepción remota y GIS

Consiste en el procesamiento de imágenes satelitales con acoplamientos de modelos hidrológicos e hidráulicos para simular escurrimientos superficiales en capas de entrada y salida. Mejia-Navarro et al. (1994) usó GIS para evaluar peligro de inundación. Correia et al. (1999) utilizó GIS y datos de distintas fuentes para obtener mapas de riesgo de inundación en diferentes escenarios de crecimiento urbano. Schumann et al. (2000) desarrollaron un método basado a procesamiento de imágenes en GIS acoplados a modelos hidrológicos. Liu et al. (2003) estimaron la distribución espacial adhiriendo datos con pendiente y rugosidad con datos de uso de suelo. Chen et al. (2009) aplicó un modelo basado en GIS, que incluye un modelo de escurrimiento y riesgo de inundación. La *Figura 2.1.3* esquematiza la metodología en forma general.

³ Anacrónimo en *inglés* de: Sistema de Información Geográfica

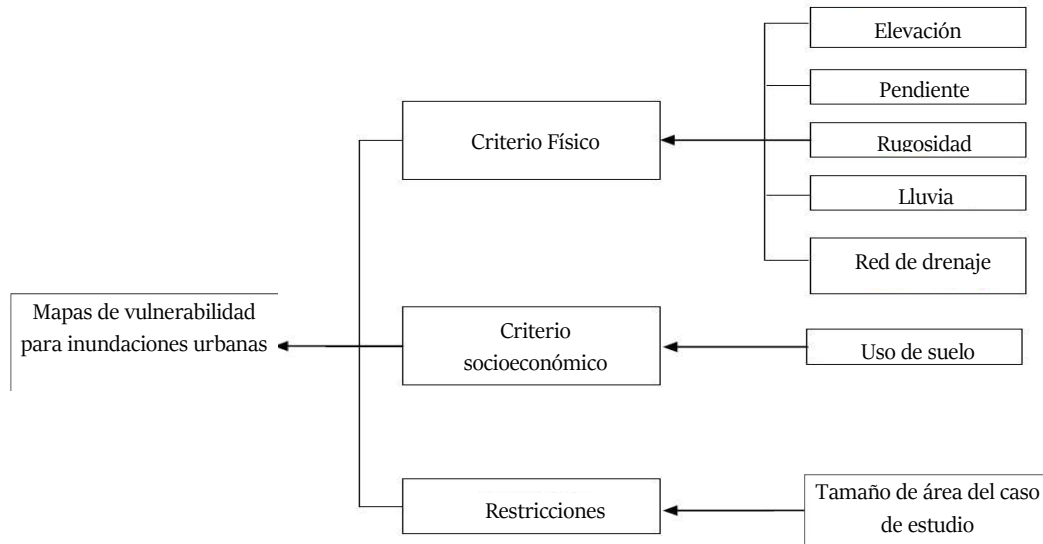


Figura 2.1.2 Metodología multicriterio

Fuente: Adaptación Ouma et al., 2014

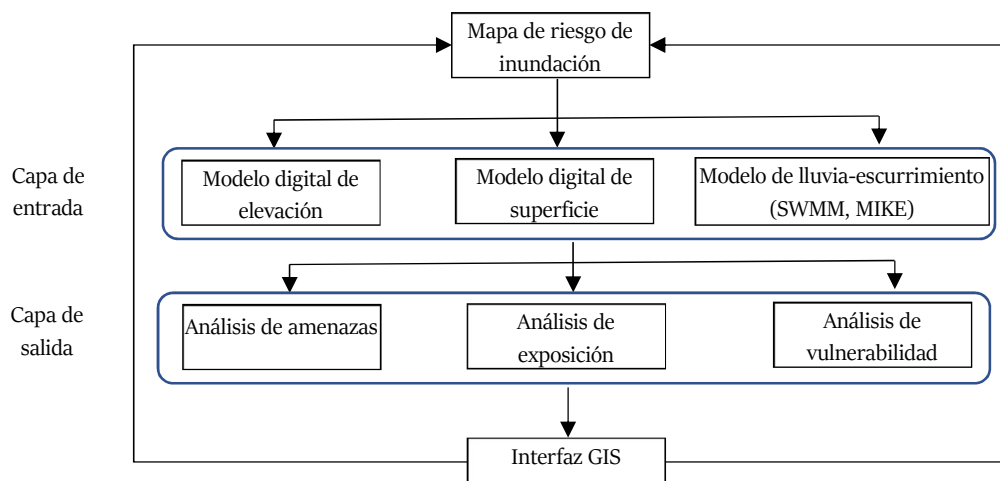


Figura 2.1.3 Metodología enfoque Percepción Remota y GIS

Fuente: Adaptación Lyu et al., 2019

2.1.3.4 Enfoque de Escenarios

Para un análisis a partir de escenarios, la metodología consiste en predecir el riesgo de inundación con información topográfica, geomorfológica y la red de drenaje urbano. La principal herramienta del enfoque es generar análisis de riesgo con los mapas de inundación; a partir de una simulación que incluyen altura y extensión de la inundación. Bates y De Roo (2000) utilizaron ráster y simularon con la fórmula de onda difusiva en una cuadrícula regular. En 2010, Bates desarrolló una fórmula explícita de la ecuación de Saint-Venant despreciando la advección. Karamouz et al. (2010) propusieron un algoritmo para mejorar la confiabilidad del sistema en inundaciones urbanas.

Chang et al. (2015) simuló un flujo dinámico en la red de drenaje pluvial. Courty et al. (2017) construyó un modelo dinámico para inundaciones aplicando características de drenaje. En general, las simulaciones y el procesamiento de datos para la construcción de escenarios, determinan riesgos en un entorno regional. Existe, además una herramienta impulsada por la Agencia Nacional de Manejo de Desastres de Indonesia (BNPB) y el Gobierno de Australia, a través del Fondo Australia-Indonesia para la Reducción de Desastres (AIFDR), en asociación con el Banco Mundial. InaSAFE elabora escenarios de impacto utilizando información de amenaza y exposición. Consiste en un software gratuito y de código abierto que calcula el impacto en las personas y la infraestructura por una amenaza como inundación, sismo, tsunami, etc. Esta herramienta puede ser complementaria para los productos obtenidos con la metodología de simulaciones.

2.1.4 Criterios para evaluación de riesgos

De lo expuesto en el inciso 2.1.3 la cuantificación y cualificación de los riesgos de inundación contribuyen a una gestión adecuada del riesgo, estableciendo jerarquías de advertencia. Ya sea por la excedencia de intensidades promedio de precipitación o la acumulación de las mismas durante periodos cortos, el peligro por inundación en zonas urbanas se puede determinar a partir del tirante y velocidad del flujo en superficie (CENAPRED, 2006). Cualesquiera que sean los rubros de clasificación, estos requieren de un análisis hidráulico previo y un refinamiento según las afectaciones a la infraestructura básica y la seguridad de las personas (New South Wales Government, 2005).

2.1.4.1 Criterio Francés

El gobierno francés, a través de la Oficina Federal de la Economía de las Aguas (OFEE), Loat y Petrascheck (1997); desarrollaron un criterio para evaluar el riesgo de inundación, clasificados en tres tipos: alto, medio y bajo (Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Criterio OFEE

Clasificación	Altura h (m)	Descripción
Alto	$h > 2$	La población está en riesgo dentro y fuera de las viviendas.
Medio	$0.5 < h < 2$	La población está en riesgo fuera de las viviendas y las edificaciones pueden sufrir daños.
Bajo	$0 < h < 0.5$	Las edificaciones pueden sufrir daños leves, y la inundación o el arrastre de sedimentos pueden llegar a afectar el interior de las edificaciones.

2.1.4.2 Criterio de los Estados Unidos

La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias de los Estados Unidos (FEMA) por su parte, desarrolló en 2009 un criterio de acuerdo a las siguientes consideraciones:

Tabla 2.3 Criterio FEMA

Clasificación	Altura h (m)	Descripción
Alto	$h > 1.4$	Fallas estructurales en edificaciones y peligro en la vida de la población.
Moderado	$0.9 < h < 1.4$	Afectaciones en edificaciones y daños en integridad de la población.
Bajo	$0 < h < 0.9$	Daños ligeros en edificaciones y sin afectaciones a la población.

En referencia al criterio FEMA, se puede observar la clasificación en 3 casos de peligro. Sin embargo, realizando un comparativo con el criterio francés, FEMA adopta un criterio similar a una distribución tipo Gumbel. Por su parte, OFEE tiene tirantes máximos de hasta 2 m constantes con velocidad de 1 m/s. Seguidamente, mantiene un comportamiento de una exponencial descendiente, con tirantes menores en tanto la velocidad aumenta. Desde esa perspectiva, la clasificación de amenaza determinará los planes de mitigación a construir.

2.1.4.3 Criterio del Gobierno de Australia

El criterio aplicado en Nuevo Gales del Sur, estableció el criterio en 2005 en dos rangos: Alto y Bajo principalmente; con una etapa de transición, mostrada en la *Tabla 2.4*.

Tabla 2.4 Criterio de New South Wales

Clasificación	Altura h (m)	Descripción
Alto	$h > 1$	Alto daño estructural de edificaciones, dificultad de evacuación de vehículos, problema para adultos en cruzar calles.
Transición	$0.7 < h < 1$	Inestabilidad de personas para cruce de calles, depende de la condición del lugar.
Bajo	$0 < h < 0.7$	Posibilidad de evacuación de vehículos, dificultad para adultos mayores, niños y discapacitados para cruzar las avenidas con seguridad.

2.1.4.4 Criterio propuesto por el IMTA

El criterio de riesgo de inundación propuesto por el IMTA en 2015 se basa en investigaciones de Alcocer-Yamanaka et al. (2012), con los que posteriormente se fabricaron mapas de riesgo, mostrados en la *Tabla 2.5*. Dicho criterio, establece el nivel de peligro por volcamiento y deslizamiento en las cuatro categorías (ver *Tabla 2.6*) de acuerdo a la ecuación de estabilidad al deslizamiento:

$$F = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2 \quad (2)$$

Donde F es la fuerza de arrastre del agua, C_d el coeficiente de arrastre que depende de la forma de la superficie, ρ densidad del fluido, A proyección frontal del área de donde actúa la fuerza del agua y v la velocidad del fluido.

Tabla 2.5 a Criterio tirante IMTA

Clasificación	Altura h (m)	Descripción
Alto	$h \geq 1.5$	Alto daño estructural a casas.
Medio	$0.5 \leq h < 1.5$	Daño a muebles y estructura de casas.
Bajo	$0.3 \leq h < 0.5$	Daño bajo a estructura de casa y menaje no considerable.
Nulo	$h < 0.3$	Tirante no rebasa altura de banqueteta.

Tabla 2.5 b Criterio volcamiento y deslizamiento IMTA

Clasificación	Volcamiento	Deslizamiento
Alto	$vh \geq 1.5$	$v^2h \geq 1.23$
Medio	$0.5 \leq vh < 1.5$	$0.5 \leq v^2h < 1.23$
Bajo	$0.3 \leq vh < 0.5$	$0.3 \leq v^2h < 0.5$
Nulo	$vh < 0.3$	$v^2h < 0.3$

2.1.4.5 Criterio propuesto por el CENAPRED

Dentro de los lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por inundación (CENAPRED, 2014), el Centro Nacional para la Prevención de Desastres estipula que pueden aplicarse tanto los criterios de severidad publicados en la investigación de Nuevo Gales, la clasificación del IMTA y el criterio del Instituto de Ingeniería; que maneja 5 curvas según el nomograma⁴ (De la Cruz, 2013) resumido:

Tabla 2.6 Criterio de severidad de inundación

Clasificación	Altura (m)	Velocidad (m/s)
A	$h > 2$	$V > 2$
B	$1 < h \leq 2$	$V \leq 2$
C	$0.8 \leq h \leq 1$	$V \leq 2$
D	$0.3 \leq h \leq 0.8$	$V \leq 2$
E	$h \leq 0.3$	$V \leq 2$

2.2 Inundaciones en sistemas de transporte

Las inundaciones en sistemas de transporte son un caso particular de las inundaciones urbanas, integrados a la infraestructura vial y considerados como una edificación distinta a los puentes y vías de acceso. Sin lugar a dudas, existe una brecha entre práctica y métodos de evaluación de riesgos en infraestructura (Suárez et al., 2005), puesto que la mayoría de las investigaciones se

⁴ Ver Nomogramas de distintos criterios en Anexo (A.1 - A.4)

centran en inundaciones regionales, focalización de lugares con dimensiones mayores y propuestas a mayor escala (Cunnane, 1988; Parida et al., 1998; Scawthorn et al., 2006). Durante un evento de inundación urbana, el riesgo del transporte está relacionado al tipo y modalidad en su carácter de confinado (p.ej. red de metro, red de autobuses biarticulados y ferrocarriles) que están imposibilitados a ejercer dispersión durante el incremento de los tirantes; propiciando rezago en los viajes, demoras y en el peor de los casos daños incalculables en su infraestructura y a los usuarios. Por tal motivo, durante la búsqueda a reducir las inundaciones en zonas urbanas, la resiliencia⁵ generalizada de las urbes, involucra a los medios de transporte y su enlace con la vulnerabilidad. Para Reggiani et al. (2015) la resiliencia en el sistema de transporte debe estar comprendido por un análisis que enmarque e interprete la relación con vulnerabilidad. Turner et al. (2003), Berkes (2007), Balica et al. (2009) y Hufschmidt (2011) exponen que la vulnerabilidad es predecible con indicadores como: exposición, susceptibilidad y resiliencia. Aun cuando la resiliencia y vulnerabilidad sean importantes en la prevención de demoras o intermitencias del servicio, las causas de las anomalías en sistemas de transporte pueden clasificarse de acuerdo a Mattson y Jenelius (2015) en dos principales: internas, donde persisten fallas técnicas; y externas, por condiciones adversas como el clima o desastres naturales. Wang et al. (2015) compara el nivel de daño con la frecuencia de eventos en un sistema de transporte, resumidas en tres características principales: recuperación eficiente ante desastres; confiabilidad en términos de conectividad de red y tiempo de viaje; y sostenibilidad económica, ambiental y social. Así, la relación vulnerabilidad-resiliencia determina la capacidad que un sistema de transporte tenga en recuperarse de eventos como inundaciones a pesar de que la frecuencia de eventos sea aislada, pero impacten severamente (*ver Figura 2.2.1*). En base a dicho análisis, las propuestas de mejora, mitigación y disminución de afectaciones tomando en cuenta la resiliencia, el volumen de afluencia de pasajeros y los tipos de infraestructura; incrementará la confiabilidad del transporte y una respuesta eficaz ante eventos de inundación.

⁵ La resiliencia se define como la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuesta a peligros para resistir, absorber, acomodar, adaptarse, transformarse y recuperarse de los efectos de un peligro de manera oportuna y eficiente; incluso mediante la preservación y restauración de sus estructuras básicas esenciales y funciones a través de la gestión de vulnerabilidad y riesgo (UNISDR, 2017)

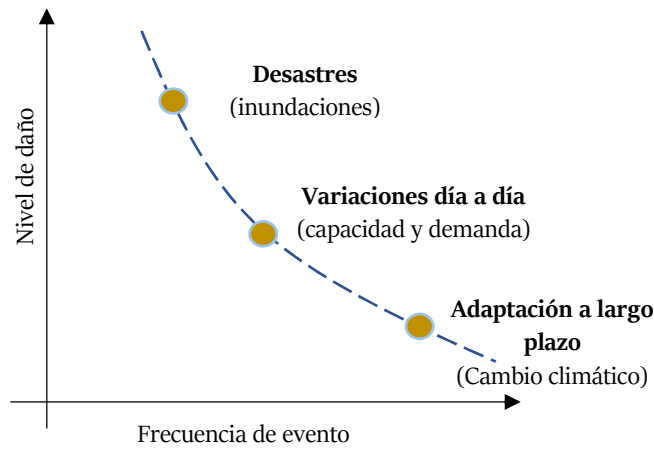


Figura 2.2.1 Clasificación de intermitencias en sistemas de transporte.

Fuente: Adaptación Wang et al., 2015

2.2.1 Inundaciones históricas en metro

El estudio global de inundaciones en sistemas de trenes metropolitanos (metro) están relacionados con eventos registrados a partir de 1992 (Lyu, et al., 2018). Algunas investigaciones están orientadas a proponer medidas de mitigación, herramientas de análisis de inundación en túneles y la cuantificación de riesgo. A continuación, se describen los casos más sobresalientes:

Inundación del metro de Chicago, EE.UU.

El 13 de abril de 1992 un muro de los canales de Chicago tuvo un daño, provocando una fuga hacia la red de sótanos y túneles de la ciudad, incluyendo los que alojan el metro. El Chicago Loop fue declarado área de emergencia federal. Los trabajos de taponamiento tardaron 37 días, basados en la réplica de la falla del túnel con un modelo geotécnico. Las pérdidas por el bombeo del agua filtrada a los túneles y las reparaciones estructurales se calculan en 5,5 millones de dólares.

Inundación del metro de Fukuoka, Japón.

La madrugada del 29 de junio de 1999 una lluvia de 77 mm/h incrementó el nivel del río Mikasa y su afluente Sannouse desbordándose a las orillas. El flujo corrió por las calles hasta las cercanías con la estación "Hakata-eki", causando graves daños en la actividad económica. Debido a la ubicación de la mayoría de las ciudades japonesas en llanura de inundación, el riesgo es inminente. Los casos más graves han ocurrido en Fukuoka y Shinjuku; en ambos casos, las víctimas se ahogaron en el espacio subterráneo (Herath et al., 2004).



Figura 2.2.2 Inundación en el metro de Fukuoka

Fuente: Hashimoto et al., 2008; River Bureau of the Ministry of Land of Japan, 2008

Inundación del metro de Praga, República Checa.

Durante la segunda semana de agosto de 2002, las intensas lluvias saturaron el suelo del sur y suroeste de Bohemia, lo que ocasionó una crecida en el río Moldava de un periodo de retorno de 500 años. El escurrimiento hacia aguas abajo generó el desbordamiento e inundaron gran parte de la ciudad capital entre el 13 y 14 de agosto de 2002. El tirante en algunas estaciones superó los 2 metros de altura, afectando 17 estaciones del metro de Praga.

Inundación en el metro de Nueva York, EE.UU.

El daño causado al metro de Nueva York, ocurrió el 29 de octubre de 2012, cuando el Huracán Sandy tocó la costa este de Estados Unidos. Las lluvias torrenciales, fuertes vientos y marejadas afectaron a más de 23,000 personas y cerca de 8.5 millones de casas sin electricidad. Según información de la Autoridad Metropolitana de Transporte (MTA), la inundación afectó al metro con pérdidas cuantificadas en 5 mil millones de dólares, por conceptos como limpieza, rehabilitación de daños menores y el restablecimiento del servicio en algunas estaciones. Las pérdidas por la interrupción en el servicio y la rehabilitación de otras estaciones con daños graves no han sido reveladas, en los que las obras se prolongaron hasta años posteriores.

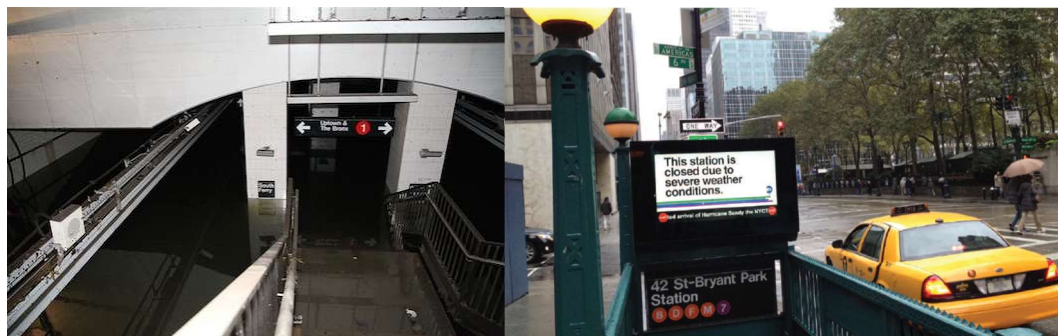


Figura 2.2.3 Inundación en el Metro de Nueva York

Fuente: MTA New York City Transit / Leonard Wiggins, 2012

Inundación en el metro de Guangzhou, China

El 10 de mayo de 2016, Guangzhou experimentó una fuerte tormenta con precipitación media de 67.6 mm durante un período de 16 h. Las intensas lluvias en forma regional, las condiciones topográficas y la influencia del mar; ocasionaron inundaciones en toda la ciudad destruyendo muros de protección, inundación en tramos carreteros e inundando varias líneas del metro. Debido al volumen del flujo y la conectividad de las estaciones del metro, los túneles se convirtieron en un río subterráneo (Lyu, 2016). Más de 100,000 personas fueron afectadas y ocho personas murieron. Se estima que la pérdida económica directa causada por este incidente asciende a más de 5 mil millones de dólares.



Figura 2.2.4 Inundación en el metro de Guangzhou

Fuente: Lyu et al., 2016

2.2.3 Estudio de las inundaciones en sistemas de transporte

De la narración de eventos de inundación en sistemas de metro, se desprenden los estudios siguientes: Herath y Dutta (2004) registraron el desastre en Fukuoka y presentaron un modelo 3D simulando la inundación del 29 de junio. Consistió en un modelo hidrológico distribuido acoplado en dos fases: el río con el modelo difusivo unidimensional y la inundación en superficie con un modelo difuso en 2D. Para la caracterización del suelo se emplearon Modelos Digitales de Elevación y el Modelo Digital de Superficie para delinear las edificaciones. Hashimoto et. al (2008) modeló el mismo evento en 2D, considerando el efecto de la alta densidad de casas y edificaciones. Aplicó dos tipos de condiciones: el esfuerzo cortante inferior con la ecuación de Manning (0.043) y las fuerzas de arrastre con el coeficiente de arrastre (2.05). Jakoubek (2007) registró la afectación en el metro de Praga y publicó soluciones de protección a estaciones superficiales. Consistieron en 2 alternativas: a) Muros permanentes y barreras móviles de hasta 1.8 m de altura para formar encajonamientos de concreto anclados a estratos duros, calculados para evitar efectos de flotación. b) Drenajes horizontales de 200 mm de diámetro en superficie conducidos a pozos de absorción de rápido drenado. Suárez et. al (2005) construyó una metodología para analizar interrupciones de viajes en el transporte urbano en superficie de Boston y daños en la infraestructura por inundaciones. Se basó en escenarios con herramientas de GIS, para distintos periodos de retorno utilizando: uso del suelo, condiciones demográficas y climáticas. Quan et al. (2011) propuso un modelo simplificado de encharcamiento urbano para simular tirantes a partir de tres partes: análisis de modelo de terreno, modelación lluvia- escurrimiento y modelo de corrección topográfica. Analizó para periodos de retorno de 100, 500 y 1000 años de retorno en el área urbana

de Shanghái, China. Clasificó el riesgo de encharcamiento en 3 niveles (bajo, medio y alto riesgo) para las líneas 1,2,4,7,8,9 y 11. Aoki et al. (2016) propuso medidas anti-inundación para las estaciones subterráneas del Metro de Tokio como barreras metálicas y compuertas en las entradas a las estaciones. Lyu et al. (2016) obtuvo mapas de amenaza en la red del metro de Guangzhou analizando la elevación y pendiente. Además, generó información de lluvia a partir de los registros del Bureau Meteorológico de Guangzhou. En 2018, aplicó un modelo de aproximación basado en GIS para obtener los riesgos por inundación con capas base e índices multicriterio. Colombo et al. (2018) convirtió un modelo numérico 3D en un modelo estocástico para evaluar los peligros hidrogeológicos para las infraestructuras subterráneas causadas por el aumento del nivel de agua subterránea observado en Milán, Italia. La *Tabla 2.7* presenta una comparación de investigaciones en inundaciones de líneas de metro.

Tabla 2.7 Comparación de investigaciones y enfoques en redes de metro

Referencias	Enfoque	Objetivos
Herath et al., (2004)	GIS -Escenario	Propuesta de modelo matemático para predecir inundaciones subterráneas
Suárez et al., (2005)	Percepción Remota -GIS	Desarrollo de metodología para evaluación de inundaciones en red de transporte urbano
Jakoubek (2007)	Desarrollo de alternativas	Propuestas de infraestructura para mitigar inundación en metro superficial
Hashimoto et al. (2008)	Modelo Numérico	Desarrollo de modelo numérico 2D para simulaciones en zonas urbanas
Quan et al. (2011)	Escenario	Análisis de riesgo a encharcamientos en metro urbano
Aoki et al. (2016)	Desarrollo de alternativas	Propuestas de infraestructura para mitigar inundación en metro subterráneo
Lyu et al. (2018)	Multicriterio -Estadístico-GIS	Análisis de riesgo cuantitativo de inundación en metro urbano

Capítulo 3



Tepalcates (Tepalcatl)
"trasto de barro"

Metodología

El estudio de vulnerabilidad en una red de transporte público puede estar diferenciada según el enfoque y cobertura que se requiere. De acuerdo a la información descrita en el inciso 2.2.3, el estudio regional determina condiciones generales en las que difícilmente se explican las características de la inundación, obras necesarias a implementar e incluso; si se requiere un plan de evacuación si alguna estación se encuentra en riesgo. Por tanto, este estudio se enfoca en un análisis local pero no limitativo, en casos donde se decida estimar vulnerabilidad integral de una red de transporte. Este capítulo detallará la metodología empleada para la generación de mapas de vulnerabilidad en infraestructura de trenes urbanos por inundación de lluvias convectivas y su impacto futuro. El marco empleado pretender responder a la motivación descrita anteriormente, con información recabada en sitios de acceso libre y del Gobierno de la Ciudad de México. Además, se basa en software de código abierto, promoviendo nuevas técnicas de análisis comparadas y probadas con éxito. La metodología consta de dos partes principales, a saber:

1. Generación de mapas de amenaza (inundación) con *Geographic Resources Analysis Support System* (GRASS) y el modelo acoplado bidimensional Itzi. Calibración de la metodología y pronóstico de eventos futuros.
2. Cruce de mapas de amenaza e infraestructura de análisis y obtención de vulnerabilidad con InaSAFE.

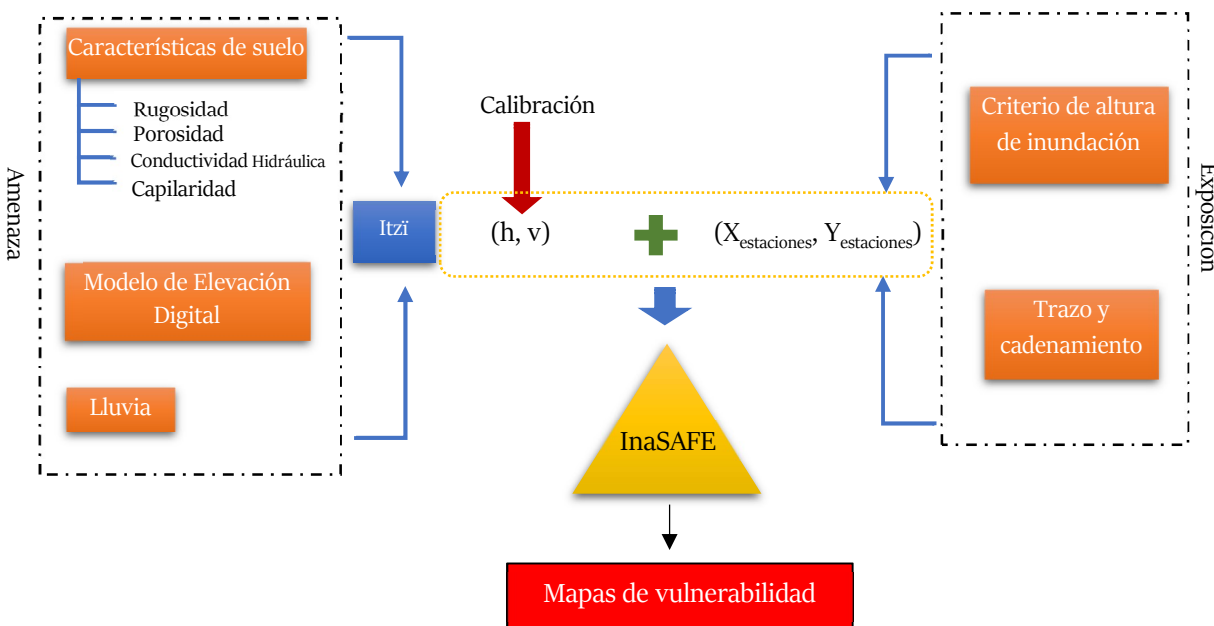


Figura 3.1.1 Metodología general de estudio

Así mismo se incluye el análisis de eventos pasados para determinar las zonas de estudio con los reportes de encharcamientos; estimación de uso de suelo con información de *Soil Grids* y generación de ráster de lluvia con mediciones del Observatorio Hidrológico. Se apoyará de los ráster de lluvia con periodo de retorno 2,5,10,50 y 100 años del Atlas Nacional de Riesgos (ANRI) versión 2016, generados por Instituto de Ingeniería para el Centro de Prevención de Desastres (CENAPRED).

3.1 Modelo Hidrodinámico

Para generar los mapas de amenaza es importante recabar información necesaria y procesarla en el modelo hidrodinámico. Como en todo proyecto, la base del análisis debe ser la zona de estudio y las condiciones en la que se encuentra.

3.1.1 Proceso

El objetivo principal de este trabajo es que la metodología pueda ser reproducida para distintas zonas urbanas, de tal manera que la definición del área de estudio y el enfoque a seguir - pueda construirse con datos libres; mientras que el modelo hidrodinámico se ejecute con información limitada. Existen en el mercado diversos modelos que arrojan resultados con mucha precisión, sin embargo; algunos pueden ser costosos y requieren de gran cantidad de variables. Por esta razón se optó por un modelo hidrodinámico, de código abierto y ensamblado en un GIS; disponible⁶. El modelo hidrodinámico bidimensional Itzi fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería (Courty, Pedrozo-Acuña, 2016), diseñado para simular inundaciones urbanas, con capacidad de ensamblar una red de drenaje y un módulo del cálculo de infiltración con la solución de la ecuación de Green-Ampt. El esquema general de solución se realiza con diferencias finitas entre celdas, opcionalmente por determinar tirante, velocidad, dirección del flujo, etc., [Ec. 3]

$$h^{t+\Delta t_{2D}} = h^t + h_{ext}^t + \frac{\sum Q_{ij}^t}{\Delta x \Delta y} \Delta t_{2D} \quad (3)$$

Donde h^t es la suma del tirante actual, h_{ext}^t todos los términos externos como lluvia, infiltración, etc., Q el flujo que pasa a través de los cuatro lados de la celda; además, utiliza un paso de tiempo adaptativo basado en la condición de Courant-Friedrich-Lewy [Ec. 4].

$$\Delta t = \alpha \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{gh_{max}}} \quad (4)$$

Donde: h_{max} es la profundidad máxima del agua en todo el dominio en m, g aceleración de la gravedad en m/s^2 , α el coeficiente de la condición Courant regularmente igual a 0.7 para flujo subcrítico.

Una de sus principales ventajas es el número de variables de entrada requeridas (ver *Tabla 3.1 y descripción en inciso 3.1.2*) y los resultados de salida. Si el tirante calculado es negativo, la altura

⁶ GRASS GIS

se toma como cero y el volumen adicional es registrado y usado para estimar la estabilidad numérica del modelo (Courty, 2018).

Debido a que la modelación con Itzi sigue un enfoque de escenarios y en algunos casos de información estadística, según sea disponible. La posibilidad de modelar con variabilidad en el tiempo, permite reconocer distintos esquemas y cambios en la precipitación o coeficientes de rugosidad en el área de estudio, a través del tiempo. En ocasiones la modelación numérica presenta inestabilidades numéricas producidas por las características del terreno, pasos de tiempo o calidad del modelo digital de elevación. Una vez obtenidos los resultados (*Tabla 3.2*), deben ser calibrados para seguidamente pasarlos a la interfaz de vulnerabilidad (*sección 3.2*).

Tabla 3.1 Información de entrada en modelo Itzi

Variable	Características	Formato
Zona de estudio	Área delimitada a simular: ubicación, cuenca, área de influencia y condiciones de frontera	Archivo vectorial y ráster
Información de lluvia	Intensidad de lluvia	Ráster o archivo temporal de ráster de lluvia
Caracterización de superficie	Porosidad efectiva, Presión Capilar y Conductividad hidráulica	Ráster de cada variable
Uso de suelo	Rugosidad (n Manning)	Ráster
Modelo Digital de elevación	Elevación de la zona de estudio	Ráster

Tabla 3.2 Información de salida en modelo Itzi

Variable	Características	Formato
Nivel de agua (tirante)	Altura de agua en metros	Ráster
Velocidad de flujo	Magnitud de la velocidad de flujo en superficie en m/s	Ráster
Flujo en frontera	Flujo de entrada y salida del dominio debido a las condiciones de entorno	Estadística
Error volumétrico	Volumen total creado debido a un error numérico, por paso de tiempo	Estadística

3.1.2 Información requerida

3.1.2.1 Ubicación y zona de estudio

Es importante tener delimitada la zona de estudio, el trazo de la línea, cadenamientos y estaciones comprendidas. Esta metodología define la zona de estudio mediante reportes de encharcamientos históricos, lo que arroja la línea del metro más propensa. Sin embargo, si no existe un historial similar; puede elegirse una zona propuesta. Otro factor importante es la topografía de la región, de la cual se desea conocer si la zona presenta pendientes por donde los escurrimientos se encuentren definidos o si el trazo de la línea este contenida en una llanura de inundación. Para fines de este estudio se utilizó información de encharcamientos y trazo del Atlas de Riesgo de la Ciudad de México. La topografía se extrajo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

3.1.2.2 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera consisten en una serie de celdas obtenidas a partir de puntos límite de la zona de estudio, donde se especifica si la frontera es de tipo abierta, cerrada y/o existe un tirante. Itzī requiere de dos ráster de condiciones de frontera: 1) Tipo de frontera, 2) Altura de tirante en frontera según la codificación de la *Tabla 3.3* y *Figura 3.1.2*.

Tabla 3.3 Código en fronteras

Código	Características
0 a 1	Frontera cerrada
2	Frontera abierta, la velocidad en frontera es igual a la velocidad en el dominio
4	Tirante definido por usuario en el dominio

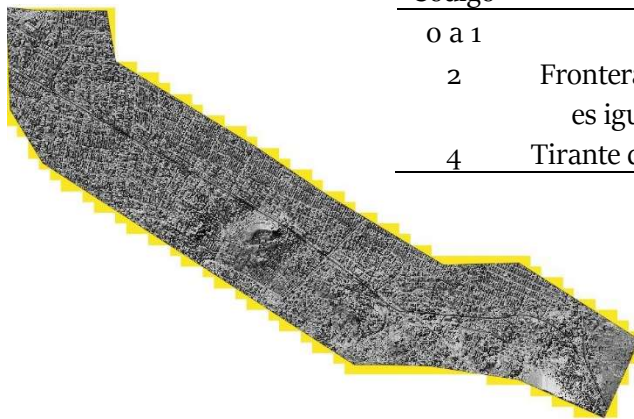


Figura 3.1.2 Fronteras en zona de estudio

3.1.2.3 Área de influencia

Las características de la cuenca son un factor para delimitar una zona de estudio como el orden de corrientes, la dirección del flujo y su acumulado. En ese sentido, la longitud de la línea o líneas analizadas definen el número de datos requeridos. Por ejemplo, en un estudio carretero López-López (2017) propone delimitar la zona de estudio en diversos tramos, si la longitud es mayor a 20 km. Otro aspecto es la delimitación transversal de la zona. Lyu et al. (2016) utiliza dos criterios basados en las investigaciones de Shen et al. (2011;2014;2016) sobre asentamientos de terreno transversales en suelos arenosos-arcillosos y lo descrito en la 7ª Conferencia Internacional sobre

Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, celebrada en México 1969. En el resumen plenario sobre excavaciones profundas y tunelización en suelo blando, Peck (1969) estima la dispersión transversal de asentamientos en la superficie del terreno producidos después de la construcción de un túnel expresados por la [Ec. 5]:

$$S_x = S_{max} e^{\frac{-x^2}{2i^2}} \quad i = 0.5d \quad (5)$$

En donde S_{max} es el asentamiento de superficie máximo, x la distancia horizontal desde la línea del eje central del túnel o túneles, i el punto de inflexión y d la distancia de la superficie al eje del túnel. Para Lyu et al. (2016) el asentamiento por la construcción del túnel generalmente varía entre 40 y 60 m. Debido a las condiciones geotécnicas del terreno, ambas consideraciones pueden aplicarse tanto en infraestructura superficial o subterránea; tomando en cuenta que la distribución de las cargas y asentamientos pueden comportarse similares en suelos blandos con alto contenido de agua, la *Figura 3.1.3* esquematiza las consideraciones de la ecuación de Peck.

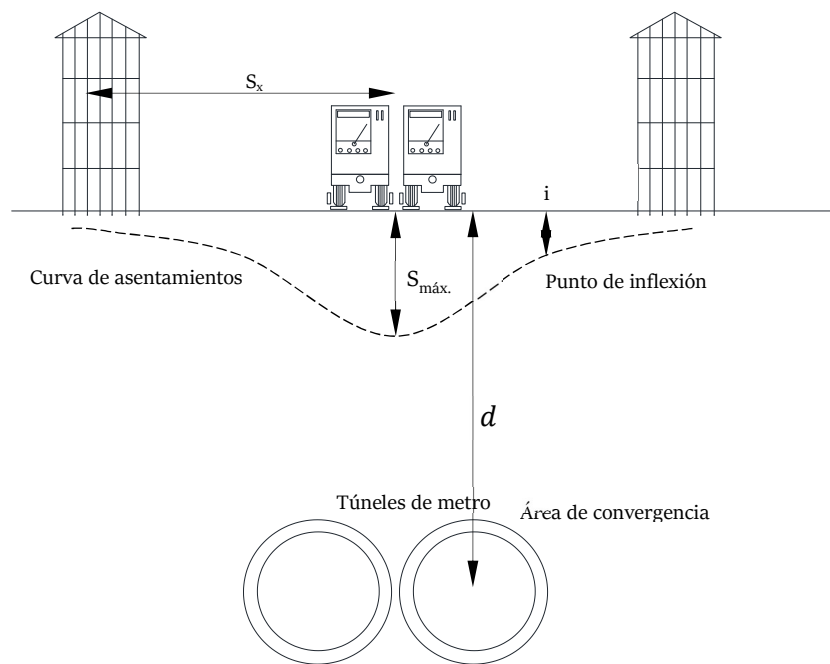


Figura 3.1.3 Esquema de la ecuación de Peck (1969)

3.1.2.4 Tiempo de simulación

Es necesario determinar el tiempo de simulación, el paso de tiempo y los lapsos de guardado durante la simulación. Debido a la operación con archivos temporales, la simulación puede realizarse con tiempos relativos o absolutos, según se requiera.

3.1.2.5 Información de Precipitación

Para simular la lluvia asociada a distintos periodos de retorno es necesario contar con la información suficiente de estaciones climatológicas o en su caso las mediciones en tiempo real. En algunos casos, las estaciones no cuentan con información completa por lo que es necesario utilizarse técnicas estadísticas para rellenar datos y obtener registros de al menos 25 años. También es necesario delimitar la región homogénea entre estaciones, para reducir la incertidumbre por la precipitación calculada.

En el año 2017 el Instituto de Ingeniería generó ráster de lluvia para distintos periodos de retorno para todo el país, apoyados de la información de 2,243 estaciones climatológicas del CLICOM y el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Dicha información fue completa según el Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño de la República Mexicana y publicada para el Atlas Nacional de Riesgo del Centro de Prevención de Desastres (CENAPRED) (Domínguez et al., 2012) (Ver A.5 y A.6). Por otra parte, el mismo instituto en 2016 presentó el proyecto Observatorio Hidrológico (OH) el cual consiste en la instalación de estaciones inteligentes que miden la lluvia en tiempo real a lo largo de la Ciudad de México y otros estados del país. Actualmente -2019- en la Ciudad de México se tienen instaladas y en funcionamiento 55 estaciones (véase A.7), de las que se puede obtener la lluvia acumulada e intensidad en tiempo real, de forma libre. Con las mediciones del OH pueden generarse ráster de alguna lluvia presentada, realizar una calibración del modelo y por consiguiente elevar el umbral de precisión en una simulación hidrodinámica.

3.1.2.6 Modelo digital de elevación

De acuerdo a Jarihani et al. (2015) la modelación hidrológica tiene una relación sustancial con la información topográfica, que de tener una resolución adecuada reduce la incertidumbre de simulación y elevar la calidad en una réplica de comportamiento en las cuencas. El DEM⁷ es información ráster a distintas resoluciones que contiene un valor determinado por cada pixel. Con el manejo de la información, en la actualidad muchas imágenes y modelos están disponibles en la red; dependiendo de las características que se necesiten. En el caso de México, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) aloja gran cantidad de información al respecto.

Contiene información de alta resolución a partir de tecnología LiDAR (*Light Detection and Ranging*), con la cual la precisión llega a pixeles de tamaño 5 x 5 m. Existen además dos tipos de catálogos: Modelo digital de elevación de superficie, que contiene pixeles con información espacial sobre lo existente; y modelos digitales de elevación de terreno, con solo las elevaciones.

Ouma et al. (2014) recomienda que, para análisis de riesgo y vulnerabilidad de sistemas de transporte por inundación, sean tomadas en cuenta todas las características del terreno (pendiente, rugosidad, etc.); en tanto Quan et al. (2011) expone que la mejor aproximación de simulación en el caso de sistemas de transporte, los modelos digitales de elevación de superficie estiman con mayor cercanía la vulnerabilidad de las estructuras. Es decir, con los DEM de superficie, se puede evaluar con mayor aproximación las circunstancias de una estación determinada, a pesar de que los árboles u otras superficies produzcan interferencia de datos y por tanto errores en la simulación hidrodinámica.

⁷ Anacrónimo en *inglés* de Modelo Digital de Elevación

3.1.2.7 Parámetros para el cálculo de infiltración

Con regularidad, la tasa de infiltración en cualquier tipo de suelo está considerada por la solución analítica de Green-Ampt (1911) la cual considera características del suelo, [Ec. 6]:

$$f = K \left(1 + \frac{(\theta_e - \theta)\psi_f}{F} \right) \quad (6)$$

Donde f es la tasa de infiltración, K conductividad hidráulica, θ_e la porosidad efectiva, θ es el contenido inicial de agua en el suelo, ψ_f la presión capilar y F la cantidad de infiltración.

Para el caso de México, estos parámetros se pueden obtener de INEGI o la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). Existe el Centro de Información y Referencia Mundial de Suelo (ISRIC) que contiene una base de datos con libre acceso - *Soil Grids* a 1 km- donde están disponibles alrededor de 110,000 sondeos a nivel mundial, además de información de textura de suelo, horizonte y mineralogía.

3.1.2.8 Uso de suelo

El cambio de uso de suelo ha sido en ocasiones, la causante de problemas de infiltración y desfogue de avenidas. Por esta razón las características superficiales deben estar totalmente delimitadas tomando en cuenta la resistencia hidráulica; en donde la fricción, coeficiente de arrastre y la aceleración del flujo están considerados por la n de Manning. Chow (1959) publicó un listado de valores de acuerdo a investigaciones en campo y determinaciones experimentales para estimar la fricción y otros factores, mostrados en la *Tabla 3.4*. A partir de percepción remota, es posible adquirir la información de superficie desde el año 1999 a escala global y local a través de la misión del *Globe Land Cover* a 30 m (Chen, 2013) (*Ver A.8*).

Tabla 3.4 Valores n Manning

Fuente Adaptación Chow,1959

Uso de suelo	N de Manning
Tierra cultivada	0.020-0.050
Bosque	0.030-0.2
Pradera	0.025-0.050
Zona urbana	0.010-0.035
Tierra desolada	0.016-0.033
Cuerpos de agua	0.03

3.1.3 Calibración y validación

Para realizar la validación del mapa de inundación, se propone verificar los datos con la simulación de lluvias y encharcamientos del Atlas de Riesgo de la Ciudad de México. El objetivo de la calibración del modelo numérico es determinar que pueda representar un evento con la menor incertidumbre, asociado a un periodo de retorno. Por lo tanto, se emplearán la metodología de Danhelka et al. (2012) a partir de una tabla de contingencias (*ver Tabla 3.5*) y la ecuación de Nash-

Sutcliffe. Se calcularán índices comparando los tirantes de la lluvia simulada (evento pronosticado) y los ocurridos según la base de datos de encharcamientos (evento observado). Así, los aciertos serán aquellos eventos pronosticados por el modelo y ocurridos; pérdidas, donde se pronostica en la simulación que un evento no ocurrirá, pero sí ocurrió; falsa alarma, los casos pronosticados del modelo como ocurridos, pero no se produjeron; y rechazados, todos los pronosticados en la simulación como no ocurridos y no producidos.

Tabla 3.5 Contingencias en un modelo

		Evento pronosticado	
		SI	NO
Evento Observado	SI	aciertos (x)	pérdidas (y)
	NO	falsa alarma(z)	rechazados (w)

De la tabla de contingencias, se calcularán los índices:

Tasa de éxito (HR) que responde a qué fracción de los eventos observados se pronosticaron correctamente entre 0 y 1. Es sensible a los aciertos, pero ignora las falsas alarmas.

$$HR = \frac{x}{(x+y)} \quad (7)$$

Radio de falsa alarma (FAR) determina la porción de los eventos pronosticados y que no ocurrieron, con valores entre 0 a 1; además, es sensible a las falsas alarmas, pero ignora las pérdidas.

$$FAR = \frac{z}{(x+z)} \quad (8)$$

Sesgo de frecuencia (FB) es la relación de los eventos pronosticados con los observados. No mide qué tan adecuado es el pronóstico con respecto a las observaciones; en cambio, mide las frecuencias relativas. Indica si el sistema de pronóstico tiende a un pronóstico subestimado $FB < 1$ o sobreestimado $FB > 1$.

$$FB = \frac{(x+z)}{(x+y)} \quad (9)$$

Índice de éxito crítico (CSI) que mide la fracción de eventos observados y / o pronosticados correctamente. Se puede considerar como la precisión del modelo, debido a que no toma en cuenta los eventos *rechazados*. Es sensible a los aciertos, penaliza tanto las pérdidas como las falsas alarmas y no distingue la fuente de error en el pronóstico. Los valores de este índice se encuentran en un rango de 0 a 1, donde 0 significa que el modelo no se acerca a lo observado y 1 que si ocurrió.

$$CSI = \frac{x}{(x+y+z)} \quad (10)$$

3.2 Mapas de vulnerabilidad

InaSAFE es un software gratuito y de código abierto, complemento para Quantum GIS (QGIS), que reproduce escenarios de impacto a peligros naturales. Fue desarrollado por la Agencia Nacional de Desastres de Indonesia (BNPB) y el Gobierno de Australia, a través del Fondo Australia-Indonesia para la Reducción de Desastres (AIFDR), en colaboración con el Banco Mundial - Fondo Global para la Reducción y Recuperación de Desastres (GFDRR). Se presentó por primera vez en la 5ª Conferencia Ministerial Asiática sobre Reducción del Riesgo de Desastres de 2012. Debido a su potencial y disponibilidad, ha sido utilizado para representar riesgos por tsunami, inundación, sismo y erupciones volcánicas; en eventos como la inundación de Jakarta en 2014 y el sismo en el sur de la Isla de Sumatra en 2009. Actualmente está en desarrollo el complemento en tiempo real, que procesará información y estimará el impacto de amenazas naturales. Además, la rutina InaSAFE está respaldada por desarrolladores de todo el mundo, teniendo grupos revisores permanentes de los Estados Unidos, Sudáfrica y Europa. En tanto se mantiene a prueba por gobiernos de China, Filipinas, Malawi, Portugal, Reino Unido y la Comunidad Europea.

3.2.1 Funcionamiento

La metodología de InaSAFE consiste en intercalar datos de amenaza y exposición en un escenario, generando mapas de vulnerabilidad por desastre específico. Debido a su carácter de procesamiento, InaSAFE no realiza ninguna modelación de amenaza o exposición. Por el contrario, el usuario debe suministrar estos datos en archivos tipo ráster para las amenazas y en formato vectorial para infraestructura, población, etc. Adicionalmente, es posible ingresar una capa denominada *agregados*, que agrupa los resultados de las afectaciones por distrito.

También contiene un enlace de búsqueda de datos de exposición con el *Open Street Maps*; recurso libre para descargar calles, sistema de transporte e infraestructura. La *Figura 3.2.1* muestra la metodología del software, en donde la capa de agregados es opcional, ya que únicamente limita el análisis. Inicialmente el programa solicita la capa de exposición y amenaza, re proyecta al mismo sistema de coordenadas y requiere que cada capa ingresada sea clasificada según sus características. Si se realiza un análisis de inundaciones en edificios, la capa de impacto producida será una capa de edificios, pero cada edificio se clasificará según si está seco, húmedo o inundado (InaSafe, 2019). InaSAFE normalmente aplicará su propia simbología a la capa de impacto de salida para dejar en claro cuáles son los edificios afectados. Finalmente, el proceso de análisis culmina con la generación de reportes mediante tablas y mapas para representar los resultados.

3.2.2 Criterio de clasificación de inundaciones

InaSAFE, requiere de un criterio de clasificación de amenaza para realizar el análisis; en ese sentido, el software contempla el criterio australiano como predeterminado. Sin embargo, este estudio tomará el criterio propuesto por el IMTA basado en investigaciones de Alcocer-Yamanaka et al. (2012) Las principales razones por las que se eligió el criterio de riesgo de inundación, peligro por volcamiento y deslizamiento son:

- Descrito y regionalizado bajo consideraciones en México.
- Fundamentado en una metodología para lluvias de 2, 5, 10, 50, 100 y 200 años de periodo de retorno.
- Toma en cuenta la infraestructura urbana de la región de estudio (configuración del terreno).
- Considera los parámetros geomorfológicos (área, perímetro, ancho, longitud del cauce principal, etc.), delimitación de subcuencas y microcuencas.
- El requerimiento para determinar el impacto de inundación en el metro, únicamente requiere de una clasificación de tirante, como se muestra en la *Tabla 2.5*.

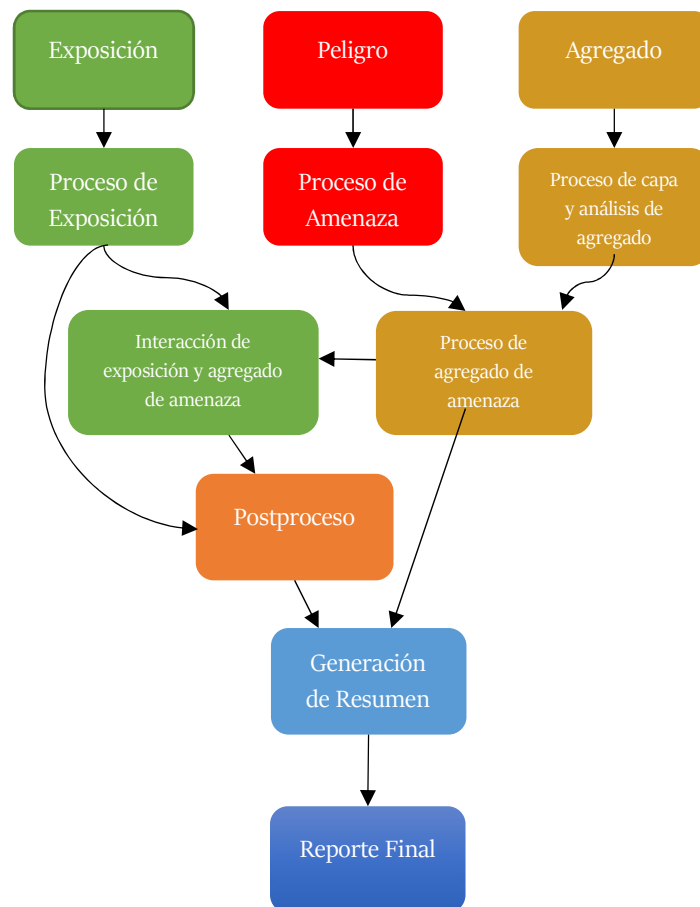


Figura 3.2.1 Metodología de InaSAFE

Fuente: Adaptación Inasafe.org

Capítulo 4



Peñón Viejo (Tepepolcotépetl)
“junto al gran cerro viejo”

Zona de Estudio

En este capítulo se presentará la zona de estudio para evaluar la vulnerabilidad en redes de transporte. En ocasión de que se analizará la red del Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México, se describirán las características generales de su cuenca y posteriormente; se mostrarán a detalle los componentes específicos de la metodología, expuestos en el capítulo anterior.

4.1 Contexto de la Ciudad de México

4.1.1 Ubicación

La Ciudad de México está comprendida dentro de la Subregión Hidrológica Administrativa XIII Aguas del Valle de México, compuesta por cuatro valles: México, Cuautitlán, Apan y Tizayuca; y de la Región Hidrológica 26 Pánuco. Se ubica entre las coordenadas 19° 03', 19° 36' Norte y 99° 57', 99° 22' Oeste; con una superficie de 1,485 km² a una altura promedio de 2,240 m.s.n.m. Está integrada dentro de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM); donde 59 municipios del Estado de México, 1 del Estado de Hidalgo y 16 Alcaldías de la Ciudad de México, conforman un área aproximada de 7,866 km². De acuerdo a la OCDE (2015) la ZMVM aloja el 17% de la población nacional con 20.1 millones de habitantes, resultando en la aglomeración más grande del país.

Debido a su extensión y población, la Ciudad de México y su área conurbada, presentan grandes desafíos. La necesidad de mejores condiciones laborales, han obligado a la migración del resto del país; trayendo problemas sociales, ambientales y de infraestructura aunado a las características geohidrológicas de la zona.

4.1.2 Fisiografía y relieve

La Ciudad de México, pertenece a la provincia fisiográfica de Lagos y Volcanes del Anáhuac, dentro del eje Neovolcánico Transversal. Presenta valles intermontañosos, mesetas y cañadas; así como terrenos semiplanos, en lo que alguna vez fueron los lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco. En la parte sur se ubica la Sierra Ajusco- Chichinautzin; al Oriente la Sierra Nevada del Popocatepetl e Iztaccíhuatl; al Poniente Sierra de las Cruces, Montealto y Montebajo; y la Sierra de Guadalupe, al Norte. Además, de prominencias topográficas aisladas como la Sierra de Santa Catarina, con el Cerro de la Estrella y el Peñón Viejo; Monte Tláloc, Peñón y el Cerro de Chapultepec (PAOT, 1998).

4.1.3 Geología

La geología de la zona está formada por rocas de la era Cenozoica con los periodos temporales Terciario y Cuaternario, en la que hubo predominancia de rocas volcánicas extrusivas, las cuales formaron las sierras que componen el eje Neovolcánico Transversal. Las rocas que afloraron fueron ígneas extrusivas, compuestas por lava (PAOT, 2000).

La parte centro-norte y oriente de la ciudad, está compuesta por depósitos aluviales y lacustres; en el poniente predominan rocas volcanoclásticas y andesitas; el centro-sur poniente, lo que corresponde a la Alcaldía Coyoacán y Tlalpan, está formada por basalto producto de la erupción del volcán Xitle; y andesitas - andesitas basálticas en la Sierra Ajusco- Chichinautzin.

De acuerdo a algunos estudios (PAOT, 2000), se han podido reconocer hasta ocho unidades estratigráficas que incluyen sedimentos clásticos, tefra, suelo y caliche. No obstante, existe una zonificación de las áreas según lo marca el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (2004):

- a) Lomerío: formada por rocas, generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelo o cohesivos relativamente blandos.
- b) Transición: depósitos profundos a 20 m o menos, constituidos por estratos arenosos y limos arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre de espesor variable.
- c) Lacustre: integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo y arcilla. Así mismo, los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales de gravas y arenas de espesores finos.

4.1.4 Edafología

Existen 15 tipos de suelo donde predominan el Andosol Húmico, Litosol y Feozem Háplico; principalmente alojado en las Alcaldías Álvaro Obregón, Cuajimalpa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tlalpan y Xochimilco (PAOT, 2000). En la parte nororiental - vaso regulador del Lago de Texcoco y los municipios de Chimalhuacán, en el Estado de México- algunas zonas contienen Solonetz. En el resto de la Ciudad de México, el tipo de suelo es variable con alto grado de degradación, por las características urbanas.

4.1.5 Hidrología y Clima

El macroclima en toda la cuenca de México es considerado como tropical de montaña puesto que, por su condición de valle, las temperaturas son templadas. Existe un gradiente climático que va de la zona noreste con áreas más secas-cálidas y a medida que se desplaza al suroeste el clima es templado subhúmedo (PAOT, 2000). La temperatura media anual es de 16 °C, con variaciones entre los meses de marzo a mayo, superando los 25 °C. El promedio de precipitación media anual es de 700 a 900 mm y en el suroeste pueden presentarse hasta 1,300 mm. La Cuenca del Valle de México estaba conformada por lagos que fungían como drenaje natural de la precipitación ocurrida en su borde montañoso, propiciando una cuenca endorreica, abierta artificialmente a finales del siglo XVII (Jiménez et al., 2002). El sistema de lagos comprendía aguas dulces -Xochimilco y Chalco- y salobres -Texcoco, Zumpango y Xaltocan- de mediana a baja profundidad.

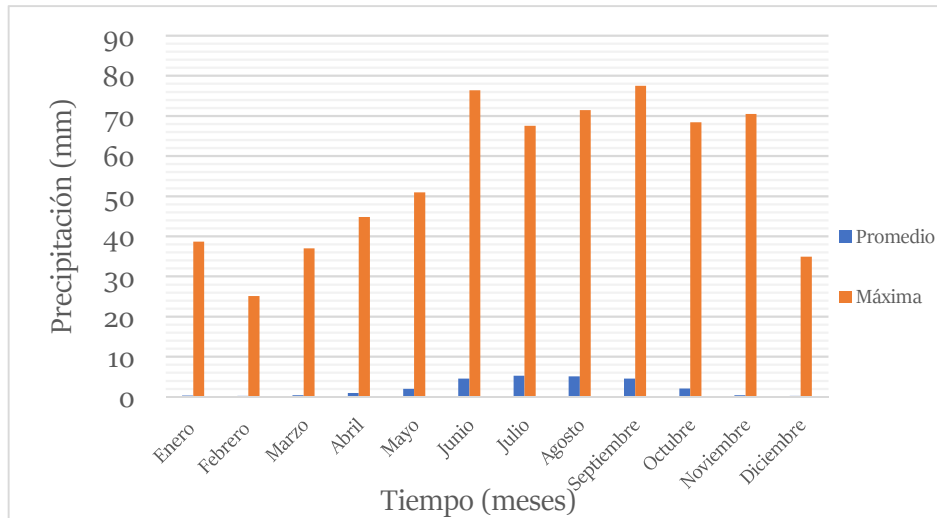


Figura 4.1.1 Distribución temporal de la precipitación media y máxima por mes en la ZMVM
 Fuente: Información de estaciones climatológicas. CONAGUA, 2015

Por lo que, ante el embate de las inundaciones, se construyeron obras para evitar el desbordamiento de los lagos, desecándolos y acelerando el crecimiento de la mancha urbana. De los cauces naturales solamente se conservan en las zonas montañosas. El más importante es el río San Buenaventura, que conduce crecientes importantes por las intensas precipitaciones combinadas con deshielos de la Sierra del Ajusco. Los restantes han sido entubados para evitar el contacto de la población con las aguas negras, entre ellos el río Churubusco, Mixcoac, Piedad y Consulado; que originalmente descargaban en el Lago de Texcoco. Otros casos son los ríos Magdalena, Mixcoac, Tacubaya y Hondo, que drenan hacia el sistema de presas del poniente y regulados en el Interceptor Poniente (PRONACCH,2013).

4.1.6 Hundimiento

El fenómeno del hundimiento por consolidación regional que se presenta en la planicie cubierta antiguamente por los lagos del valle de México persiste, con efectos acumulados a través del tiempo y afectando instalaciones metropolitanas como la red de agua potable, drenaje y el Metro de la Ciudad de México. En relación al hundimiento en la ciudad está ligado con las inundaciones, debido a la existencia de depresiones topográficas locales dificultando el drenaje de algunos colectores. No obstante, los hundimientos no uniformes afectan la calidad del transporte en el área urbana. Se presentan deformaciones y agrietamientos en pavimentos, banquetas y otros elementos de la infraestructura de transporte. Lo anterior resulta particularmente crítico en el caso de calzadas o líneas del S.T.C Metro (*Figura 4.1.2 y A.9*) que atraviesan zonas de transición entre materiales lacustres compresibles y suelos firmes (Auvinet, 2010).



Figura 4.1.2 Deformaciones diferenciales en Línea A del S.T.C. Metro
Fuente: El subsuelo de la Ciudad de México Vol. III (Auvinet et al., 2017)

4.1.7 Infraestructura de drenaje y problemas de inundación

La falta de agua potable y el desbordamiento de los lagos en época de lluvias, han sido la problemática constante desde los primeros asentamientos humanos, en el Valle de México. En esa época, la ciudad sobrevivió gracias al agua potable de los manantiales existentes en la zona sur de la cuenca y, por otra parte, los lagos eran contenidos por un dique que regulaba y separaba las aguas salobres de las dulces. Sin embargo, durante la conquista, el Albarradón de Nezahualcóyotl fue destruido, lo que provocó el desbordamiento del Lago de Texcoco en 1533. Posteriormente, en 1629 se registró una de las más grandes inundaciones con más de 30,000 muertos y aproximadamente 20,000 familias españolas desplazadas. En consecuencia, fue reconstruido el Tajo de Nochistongo en el mismo año, como solución al problema.

A lo largo del siglo XX ocurrieron innumerables eventos de inundación -como la de 1950- aún con la construcción el Túnel de Tequixquiac de 1900, el Nuevo Túnel de Tequixquiac en 1955, el Emisor Central (1975) y gran parte del sistema de drenaje profundo determinado por los interceptores Centro - Poniente, Central y Oriente, conectados por el Emisor Central hasta las afueras del valle, desembocando en el río El Salto. Así mismo, se ha ampliado la cobertura hacia el sur y el este, con objeto de auxiliar al río Churubusco y absorber las avenidas por el crecimiento acelerado de las alcaldías Iztapalapa y Tláhuac, situadas al suroriente de la Ciudad. Lo mismo sucede en los límites con el Estado de México, sobre todo en los municipios de Chalco, Ixtapaluca, Los Reyes y Nezahualcóyotl; donde su drenaje depende del río de La Compañía, que conduce los escurrimientos hacia el norte, hasta descargarlos en el Dren General del Valle y de ahí en el Gran

Canal. Las descargas del Valle de México son recibidas por la cuenca del Río Tula mediante los ríos Cuautitlán, Salado y Salto (PRONACCH,2013), con algunos problemas de insuficiencia. Por esta razón, desde el año 2008 se construye un nuevo dren -Túnel Emisor Oriente- con 62 km de longitud, para reducir los efectos de las inundaciones.

En el Diagnóstico, logros y desafíos (SACMEX, 2018) se da conocer la situación del estado actual de la infraestructura drenaje para la Ciudad de México, comprendido entre red primaria, secundaria y drenaje profundo; este último a una profundidad entre 15 a 220m. Además, se contempla el desfogue de la cuenca por medio de cauces a cielo abierto y entubados (*Tabla 4.1*).

Tabla 4.1 Infraestructura de drenaje






Fuente: SACMEX, 2018

Red primaria	2,446 km
Red Secundaria	11,644 km
Drenaje Profundo	168 km
Cauces a cielo abierto	123.9 km
Cauces entubados	49.3 km

Realizando un análisis sobre los efectos que causan la vulnerabilidad a inundaciones en la Ciudad de México, puede entenderse que gran parte de la problemática es el intercambio socio-ambiental en la zona; la profunda transformación hidrológica en la cuenca y la sobreexplotación de sus recursos hídricos, que históricamente han causado hundimientos, socavación en la cimentación de edificaciones y la infraestructura urbana. A pesar de que la Zona Metropolitana de la Ciudad de México tiene los niveles más altos en cobertura de drenaje en el país; existen zonas marginadas con servicios deficientes como son Chalco y Chimalhuacán al este, Xochimilco hacia el sureste y Ecatepec y Tultitlán al norte. Por ejemplo, el mal funcionamiento del Canal de la Compañía y el bordo de Xochiaca en las localidades de Chalco y Netzahualcóyotl respectivamente, da como resultado la inundación crónica con aguas residuales (Romero, 2010). En 2019, SACMEX publicó los 63 sitios de mayor encharcamiento de la Ciudad donde se pretender dar mayor atención en desazolve y rehabilitación del servicio de drenaje (ver Anexo A). Así mismo, durante la temporada de lluvias, la CONAGUA mantiene un plan de coordinación junto con SACMEX y CAEM para el drenaje metropolitano; del cual, se desprendió un semáforo de alerta de acuerdo a la intensidad de lluvias presentadas. Además, se instaló un radar de monitoreo de lluvias, que reporta los datos en tiempo real a través del portal oficial del SACMEX (*Tabla 4.2*).

Tabla 4.2 Semáforo de lluvia

Fuente: SACMEX, 2019

Rango (mm/ 24h)	Color	Descripción de intensidad
< 15		Condición promedio.
15 - 29		Presencia de hidrometeorológicos ligeros.
30 - 49		Fenómenos meteorológicos cuya intensidad produce daños a estructuras frágiles.
50 - 70		Fenómenos meteorológicos cuya intensidad provoca daños.
> 70		Fenómenos meteorológicos con intensidad ocasiona daños graves.

4.2 El Metro de la Ciudad de México

4.2.1 Descripción

El crecimiento demográfico de la Ciudad de México y su mancha urbana a principios del siglo XX y XXI; ha obligado a los gobiernos a invertir en la reconfiguración, adaptación y mejoramiento de sus servicios. Basado en el primer ferrocarril urbano de Londres construido en 1863, el Sistema de Transporte Colectivo Metro fue una idea innovadora para la solución al transporte masivo de pasajeros, desde hace 50 años. Bajo el Plan Maestro del Metro, la red ha sido adaptada a través del tiempo por las condiciones topográficas y geológicas; procurando ser un transporte eficiente y de gran capacidad, con ahorro de energía, disminución de tiempo y espacio.

Debido a sus características, el Metro ha logrado cubrir una extensión de 226.5 km, comprendidas en 195 estaciones, que van de sur a norte y oriente a poniente a través de las 16 Alcaldías de la Ciudad de México y 4 Municipios del Estado de México (*ver Tabla 4.3*). Las 12 líneas que integran la red, transportan en promedio 5 millones de personas al día, de los 20.1 millones que conforman la ZMVM. El crecimiento expansivo hacia las alcaldías del poniente, oriente y en su mayoría hacia los municipios del Estado de México, particularmente los ubicados al oriente de la ciudad; representa un gran problema de abastecimiento del servicio. Por tal motivo, se busca que el metro contribuya al mejoramiento ambiental, social y urbano; reduciendo el congestionamiento vial, la seguridad de los pasajeros y con la capacidad que requiere el transporte primordial de la metrópoli.

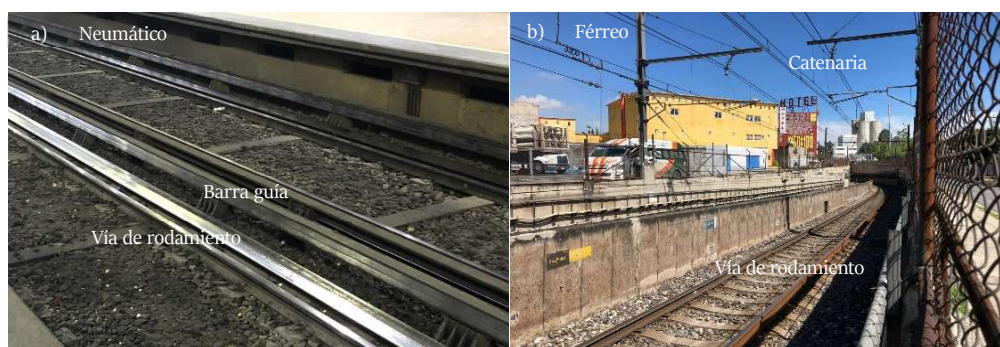


Figura 4.2.1 Abastecimiento de energía del S.T.C. Metro

Tabla 4.3 Descripción de la red del Metro de la Ciudad de México

Fuente: Propia con datos del S.T.C Metro

Línea	Ruta	Número de estaciones	Entidad Inicio	Entidad Término	Longitud (km)
1	Observatorio - Pantitlán	20	Álvaro Obregón	Venustiano Carranza	18.828
2	Taxqueña - Cuatro Caminos	24	Coyoacán	Naucalpan*	23.431
3	Universidad- Indios Verdes	21	Coyoacán	GAM	23.609
4	Santa Anita- Martin Carrera	10	Iztacalco	GAM	10.747
5	Politécnico - Pantitlán	13	GAM	Venustiano Carranza	15.675
6	El Rosario- Martin Carrera	11	Azcapotzalco	GAM	13.947
7	Barranca del Muerto - El Rosario	14	Benito Juárez	Azcapotzalco	18.784
8	Constitución de 1917- Garibaldi	19	Iztapalapa	Cuauhtémoc	20.078
9	Tacubaya- Pantitlán	12	Miguel Hidalgo	Iztacalco	15.375
A	Pantitlán- La Paz	10	Venustiano Carranza	Los Reyes*	17.192
B	Buenavista- Ciudad Azteca	21	Cuauhtémoc	Ecatepec*	23.722
12	Mixcoac- Tláhuac	20	Benito Juárez	Tláhuac	25.1

GAM: Gustavo A. Madero *Municipios del Estado de México

4.2.2 Características

Por la traza de la ciudad, topografía y resistencia del suelo, la red del Metro está constituida a partir de tres tipos de infraestructura:

- Subterránea: Consiste en tramos y estaciones contenidas en cajones desplantados y terminados en el subsuelo. El acceso a las estaciones se realiza por escaleras que descienden a los túneles de arriba.

- Superficial: La vía de rodamiento se encuentra a nivel de terreno, acotada por muros y malla ciclónica. El ingreso a las estaciones ocurre en el mismo nivel o a través de puentes y escaleras, según la logística de las mismas.
- Elevada: La superficie de rodamiento se encuentra sobre puentes y pilas. Las estaciones están desplantadas de la superficie, igualmente elevadas, con escaleras y elevadores de acceso.

De igual forma, por su funcionamiento y abastecimiento de energía, existen dos tipos de trenes:

- Neumático: Los carros constan de ejes con doble llanta y ruedas de acero, que hacen contacto con un riel paralelo a la pista de rodamiento. Cuatro ruedas giran en un plano perpendicular sobre una barra guía, encargada de conducir 750 volts hasta el motor. El sistema de freno está compuesto por bloques de madera tratada, que presiona las ruedas de acero por la banda de rodamiento.
- Férreo: Los ejes de los carros férreos contienen ruedas metálicas, mismas que se desplazan sobre rieles metálicos. El sistema de alimentación consta de un pantógrafo o barra de conducción de energía, que va desde el motor a la catenaria de suministro. Para frenar, un sistema de discos en cada eje, presiona las ruedas metálicas que evitan el desplazamiento.

4.2.3 Afluencia

De la información recabada en el sitio oficial del S.T.C. Metro, durante el 2018 la línea más transitada fue la ruta Taxqueña- Cuatro Caminos, que une el sur de la ciudad con el Municipio de Naucalpan, Estado de México; seguida por la Línea 1 que recorre de Poniente a Oriente la Ciudad y en tercer sitio la Línea 3, de sur a norte en Universidad a Indios Verdes (*Tabla 4.4*).

Tabla 4.4 Afluencia en el Metro de la Ciudad de México

Fuente: Propia, GAM: Gustavo A. Madero *Municipios del Estado de México

Línea	Tipo de tren	Número de Estaciones			Afluencia 2018
		Subterráneas	Superficiales	Elevadas	
1	Neumático	19	1		243,150,084
2	Neumático	14	10		274,537,092
3	Neumático	17	4		226,483,846
4	Neumático		2	8	30,599,358
5	Neumático	4	9		87,336,862
6	Neumático	10	1		50,554,660
7	Neumático	13	1		106,551,771
8	Neumático	14	5		133,719,638
9	Neumático	8		4	113,317,096
A	Férreo	1	9		102,576,167
B	Neumático	6	11	4	152,732,734
12	Férreo	9	2	9	125,915,705

En referencia a las 5 estaciones con mayor afluencia de pasajeros en 2018 (*Figura 4.2.2*), la estación Pantitlán de la Línea A e Indios Verdes de la Línea 3, reportaron 497,465 y 485,156 pasajeros respectivamente. Esto significa que, los viajes realizados por ambas líneas, pueden entenderse como representativos; ya sea por el ingreso a la ruta y viajando al menos entre dos estaciones. Así mismo, tales datos se corroboraron con el Diagnóstico de movilidad de la Ciudad de México (2018) y los Resultados del Análisis cruzado de la encuesta origen-destino de la ZMVM (2017). Estiman mayores volúmenes de traslado entre la periferia norte y oriente, específicamente de los municipios de Tlalnepantla, Ecatepec, Los Reyes y Nezahualcóyotl en el Estado de México, a la ciudad.



Figura 4.2.2 Afluencia por estación 2018

4.2.4 Índice de encharcamientos

Como se explicó en el apartado 4.1.6, la Ciudad de México es altamente vulnerable a las inundaciones y mayor aún toda infraestructura que se encuentre por debajo del nivel medio de elevación. En cuanto a la infraestructura del metro, puede entenderse -por el estado del arte antes revisado- que las rutas más vulnerables son las que tienen estaciones subterráneas; adicionado a las aberturas de ventilación que necesita el tren. En algunos casos las aberturas están protegidas a partir de pequeños muros circundantes; sin embargo, en otros casos los túneles de ventilación están a nivel superficial, propiciando la inmersión de agua durante las lluvias (*Figura 4.2.4 y A.10-A.12*). Otra circunstancia ocurre durante la filtración de agua subterránea o a través de los muros de contención en la infraestructura superficial. Cualquiera de los casos en donde exista ingreso de agua al carril de rodamiento del metro, puede exponer la circulación; principalmente por la velocidad alcanzada durante la marcha, los componentes eléctricos de los vagones y los mecanismos de freno.

Por esta razón, las superficies de rodamiento se encuentran desplantadas sobre drenes que conducen el agua y bombeadas directamente a la red de drenaje de la ciudad (*Figura 4.2.3*).

A pesar de la incidencia de eventos de encharcamiento e inundación en las estaciones del Metro y sus alrededores, existe poca información disponible sobre las características de los eventos como altura y daños provocados en la red. Por tal motivo, se consultaron los registros de

encharcamientos de la ciudad en el Atlas de Riesgo de la Ciudad de México y con el criterio establecido (Peck, 1969; Lyu et al., 2016) y el Diagnóstico de movilidad de la Ciudad de México (2018), se seleccionaron el número de encharcamientos en un radio mínimo a 40 m y máximo de 500 m.

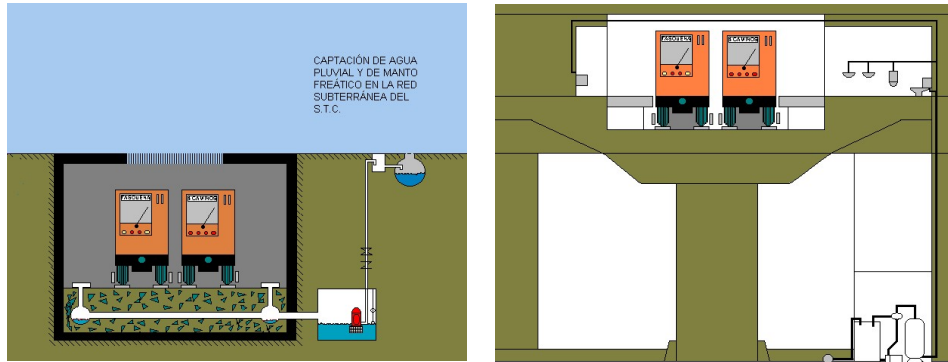


Figura 4.2.3 Esquema de drenaje pluvial y freático en el Metro

Fuente: Gerencia Instalaciones fijas del S.T.C. Metro, 2013



Figura 4.2.4 Rejillas de ventilación a nivel superficial

Fuente: Gerencia Instalaciones fijas del S.T.C. Metro, 2013

De la información mostrada en la *Tabla 4.5* la incidencia de inundaciones en los alrededores de la red del Metro ha disminuido de acuerdo a los reportes entre 2016 y 2018. Esto se debe al desazolve frecuente y las obras de rehabilitación de drenaje, que no erradicaron el problema; principalmente en la Línea A, donde las amenazas se reportaron en 7 eventos en medio año del 2018.



Figura 4.2.5 Afectaciones por inundaciones en estaciones

Fuente: Milenio, 2019

Tabla 4.5 Reportes de encharcamientos próximos

Fuente: Propia con información del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México

Línea	Reportes de encharcamiento		
	2016	2017	Julio 2018*
1	12	3	2
2	20	10	4
3	24	6	3
4	4		1
5	30	7	1
6	1	2	1
7	11	7	
8	9	4	1
9	18	2	1
A	41	8	7
B	14	5	1
12	12	6	4

En cualquiera de las circunstancias, el daño al S.T.C. por inundaciones puede representar un alto costo material e inmaterial. Por esta razón, en el Operativo por Temporada de Lluvias de 2019, se propone desazolvar la red de drenaje, instalación de diques y hacer conciencia a la población sobre el manejo adecuado de la basura.



GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO **El Metro de la Ciudad de México refrenda su compromiso con los usuarios para brindar un servicio de movilidad eficiente y seguro.**

Figura 4.2.6 Infografía del Operativo por Temporada de Lluvias en el Metro 2019

Fuente: Gobierno de la Ciudad de México, 2019

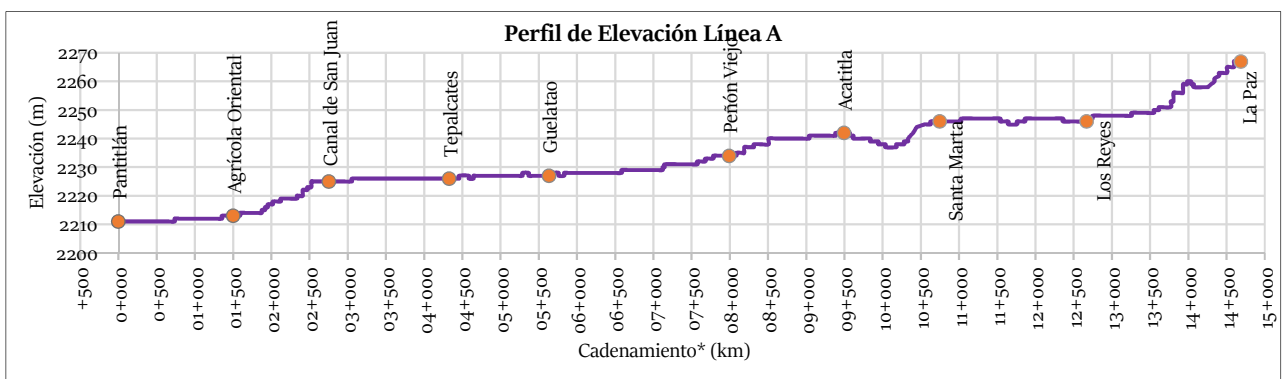
4.3 Área de estudio

4.3.1 Ubicación

La ruta Pantitlán – La Paz se encuentra en la zona oriente de la Ciudad de México y su colindancia con el Estado de México. Inicia en la estación Pantitlán, en los límites de las alcaldías Venustiano Carranza e Iztacalco a lo largo de la Calzada Ignacio Zaragoza y finaliza en la estación La Paz en el Municipio de Los Reyes Acaquilpan, Estado de México. Está compuesta por 10 estaciones con una longitud de 17.192 km totales, cuantificados desde los patios de operación y, 14. 893 km de recorrido efectivos. Fue inaugurada el 12 de agosto de 1991 como la novena línea, diferenciada por la alimentación de trenes mediante catenaria y rodadura férrea. La vía de rodamiento se encuentra a nivel superficial, salvo la estación Pantitlán y el cruce de la Calzada Ignacio Zaragoza con la Autopista México-Puebla; cuyo desnivel se encuentra entre las estaciones Acatitla y Santa Marta.

4.3.2 Características topográficas

Por las características de la Cuenca del Valle de México, la zona de estudio está acotada bajo el criterio de Peck (1969). Las elevaciones a lo largo del trazo mantienen un gradiente ascendente de 50 m (Figura 4.3.1) de poniente a oriente. Además, como se explicó anteriormente, la Línea A se encuentra alojada en mayor parte dentro de la alcaldía Iztapalapa (Figura 4.3.2) que estaba cubierta por antiguo lago de Texcoco, desde la Estación Pantitlán hasta la Estación Acatitla. Esto implica hundimientos frecuentes en la zona (Figura 4.3.3), transmitidos a la infraestructura y alta vulnerabilidad de inundación (Auvinet et al., 2017). Por lo tanto, el Modelo Digital de Elevación (DEM) de superficie integra dicha información a partir del LiDAR descargado del Continuo de Elevaciones de INEGI, con resolución a 5m (Figura 4.3.4).



*Cadenamiento construido entre terminales para estudio

Figura 4.3.1 Perfil de Terreno a lo largo de la Línea A

Fuente: Elaborado con información de S.T.C y percepción remota

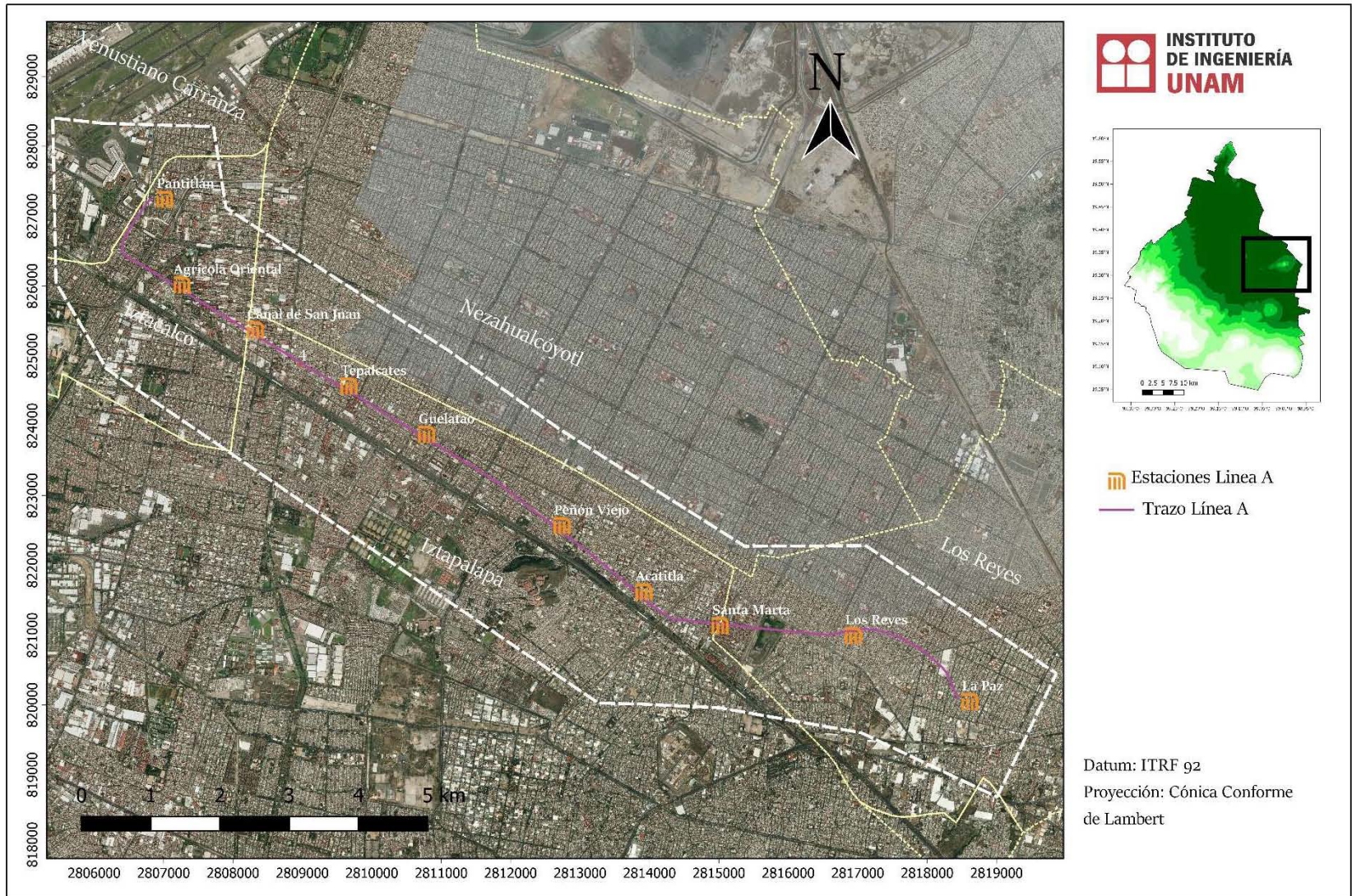


Figura 4.3.2 Ubicación de Línea A

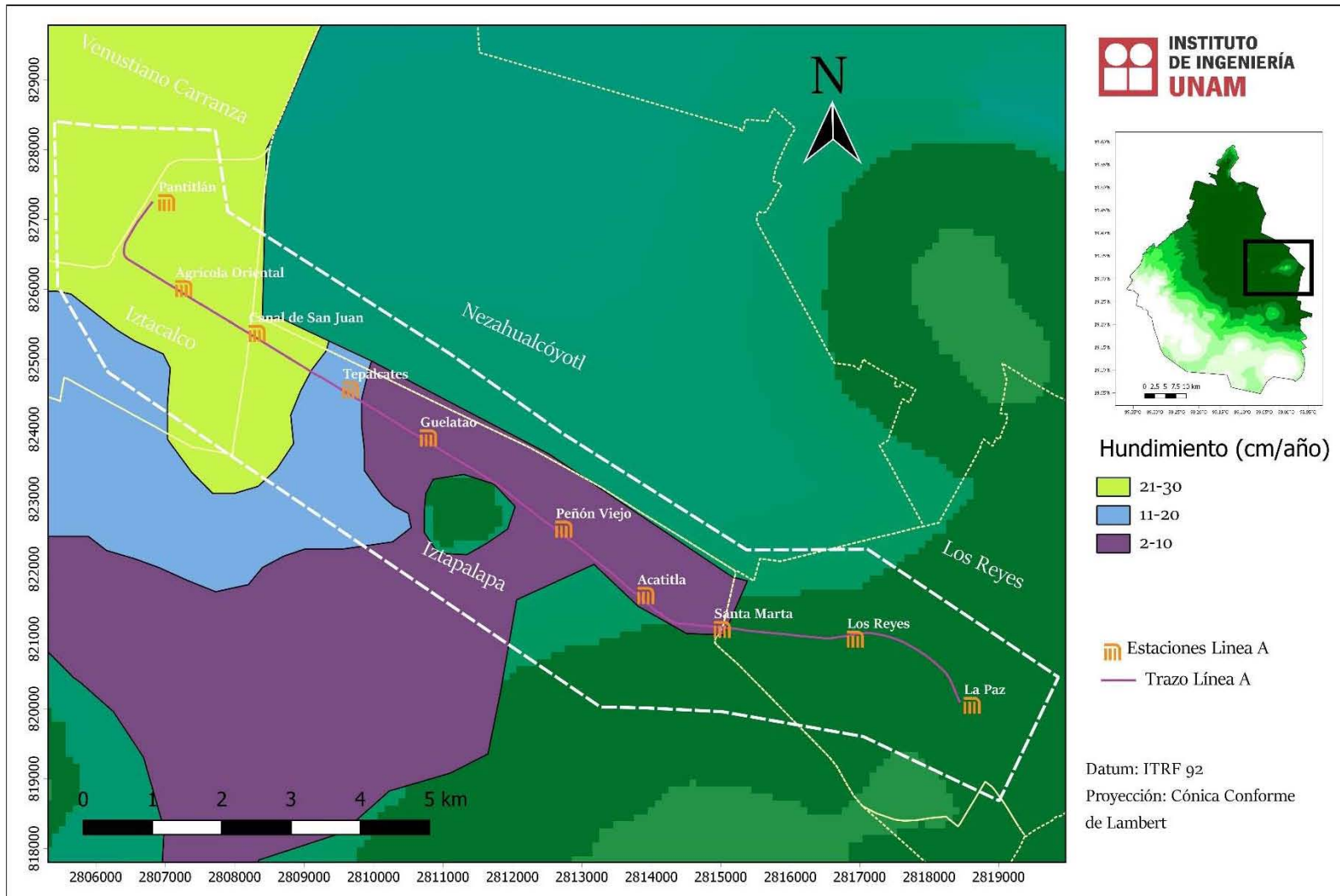


Figura 4.3.3 Hundimiento en zona de estudio
Fuente: ARCDMX, 2019



Figura 4.3.4 DEM con resolución y curvas de nivel a 5m
 Fuente: INEGI, 2019

4.3.3 Caracterización de suelo

4.3.3.1 Infiltración

Para caracterizar el suelo de la zona, se recurrió a *Soil Grids* de la cual se descargaron los contenidos de arcilla, arena y limo con resolución 5 cm a una profundidad de 2 m. Mismos que fueron clasificados (Figura 4.3.5) según los valores presentados por Rawls et. al (1983) para la obtención de infiltración con la fórmula de Green-Ampt (Tabla 4.6) De esta manera se obtuvieron los ráster de Porosidad Efectiva, Presión Capilar y Conductividad Hidráulica, requeridos en la modelación. Los contenidos de material obtenidos gratuitamente, se cotejaron además con el sondeo continuo en el PC61 de la Carretera México- Puebla, realizado en agosto de 1948 y presentado en el Volumen II de El Subsuelo de la Ciudad de México (Marsal, R. y Mazari, M., 1959).

4.3.3.2 Uso de suelo

De acuerdo a información de INEGI (Uso de suelo y Vegetación, 2011) y datos del Globe Land Cover 30, la zona de estudio se encuentra dentro de la mancha urbana de la ZMVM, con excepción de algunas áreas de matorral xerófilo. Dichas áreas se encuentran en las partes más altas como el Peñón Viejo, parques y zonas no cultivadas. Tomando en cuenta dicha información se comparó

con imagen satelital reciente, clasificando los usos de suelo con los valores propuestos de Manning según Chow (1959) (Tabla 4.7).

Tabla 4.6 Parámetros de infiltración Green-Ampt

Fuente: Adaptación Rawls et. al (1983)

Tipo de suelo	Porosidad efectiva (mm/mm)	Presión Capilar (mm)	Conductividad Hidráulica (mm/h)
Arcilla	0.385	316.3	0.3
Marga arcillo-arenosa	0.33	218.5	1.5
Marga arcillosa	0.309	208.8	1
Marga	0.434	88.9	3.4

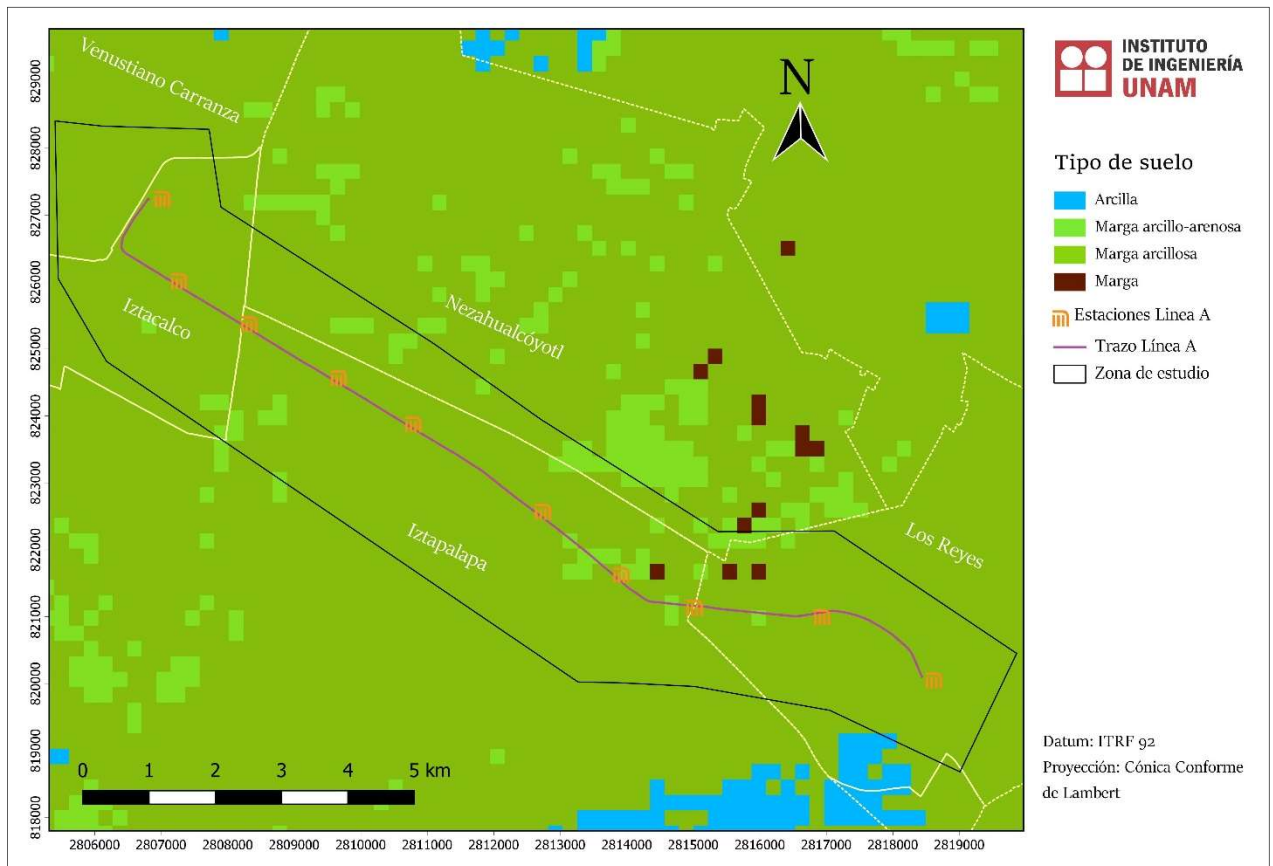


Figura 4.3.5 Análisis de suelo en zona de estudio

Fuente: Construcción con datos de Soil Grids

Tabla 4.7 n Manning
Fuente: Chow (1959)

Característica	n Manning ($\text{sm}^{-1/3}$)
Tierra desolada	0.016 - 0.033
Matorrales de baja densidad	0.035 - 0.160
Zona Urbana	0.010 - 0.035

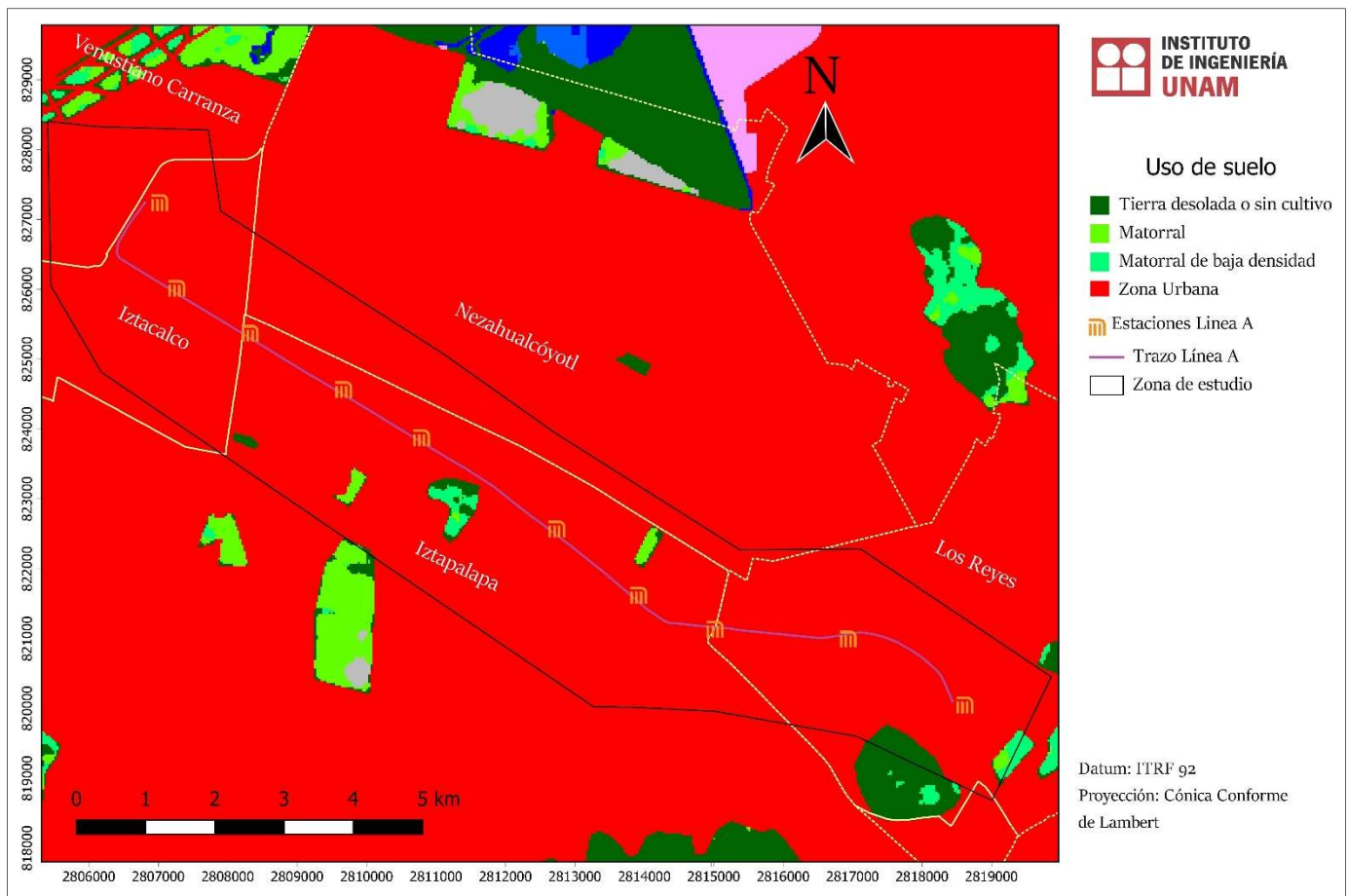


Figura 4.3.6 Uso de suelo en la zona
Fuente: Globe Land Cover 30 (2017)

4.3.5 Hidrología

Dentro de la zona contemplada de estudio se encuentra la colindancia con el río de La Compañía, que es el principal desfogue de aguas pluviales y residuales de la zona de Chalco, Valle de Chalco e Ixtapaluca. Su trayecto inicia en la confluencia de los ríos San Francisco y San Rafael, al oriente del Valle de Chalco y se une al sistema de canales del ex Lago de Texcoco en el bordo de Xochiaca.

En su recorrido atraviesa zonas densamente pobladas como Los Reyes Acaquilpan y nuevos conjuntos urbanos de la carretera federal México- Puebla (CONAGUA,2013). Por tal motivo, durante la temporada de lluvias existe el constante desbordamiento del río, afectando en gran parte a la zona de Chalco. Por esta razón, se ha entubado una parte del cauce y construidos bordos en las márgenes.

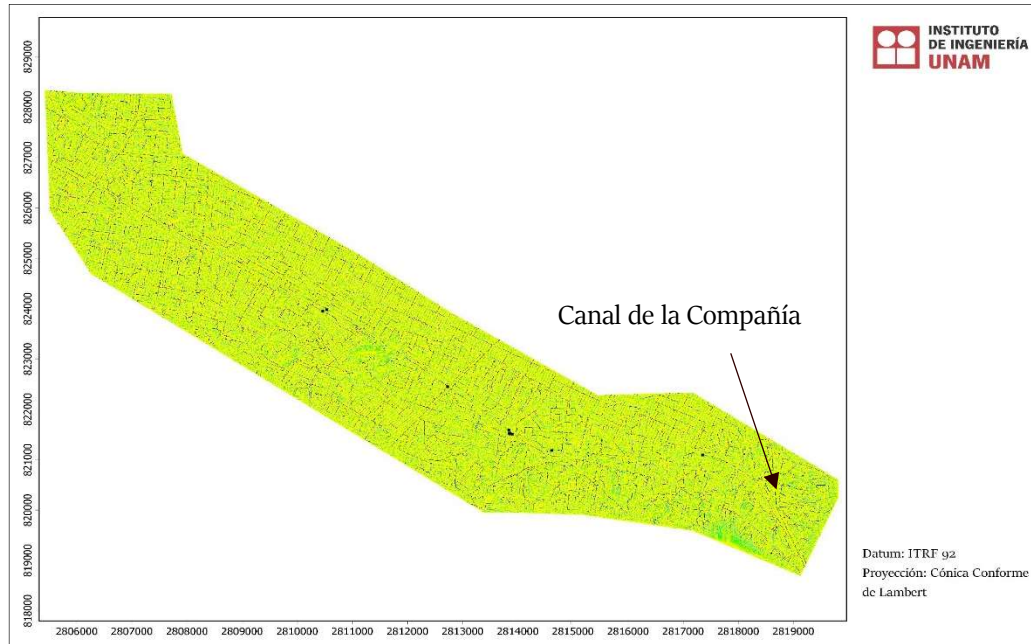


Figura 4.3.7 Flujo acumulado

Con relación al orden de corrientes, la *Figura 4.3.7* demuestra acumulación únicamente en ciertas zonas, por efecto de los hundimientos, diferenciales mínimos de elevación y principalmente por la urbanización. Así mismo es notorio el curso de los flujos respetando la traza de las calles y la trayectoria del Canal de la Compañía, cuya profundidad en la zona no rebasa los 15 m.



Figura 4.3.8 Vista de la Estación La Paz desde el Canal de la Compañía

4.3.5.1 Información de lluvia CENAPRED

La información de precipitación consiste en hietogramas de diseño adquiridos a partir de datos de CLICOM y estandarizados para distintos periodos de retorno, conforme a lo publicado en el Análisis Regional para estimar precipitaciones de diseño en la República Mexicana y los Mapas de Precipitaciones para Diferentes Periodos de Retorno y Duraciones (Domínguez et al. 2012; Domínguez et al. 2014). Así, para la zona de estudio comprendida en la parte oriente de la Ciudad de México, se interpoló la información de las estaciones (Tabla 4.8), de la que se muestra la precipitación máxima a 24 horas (Figura 4.3.10) con factor de conectividad, de acuerdo al análisis de las estaciones por región (Baeza,2007).

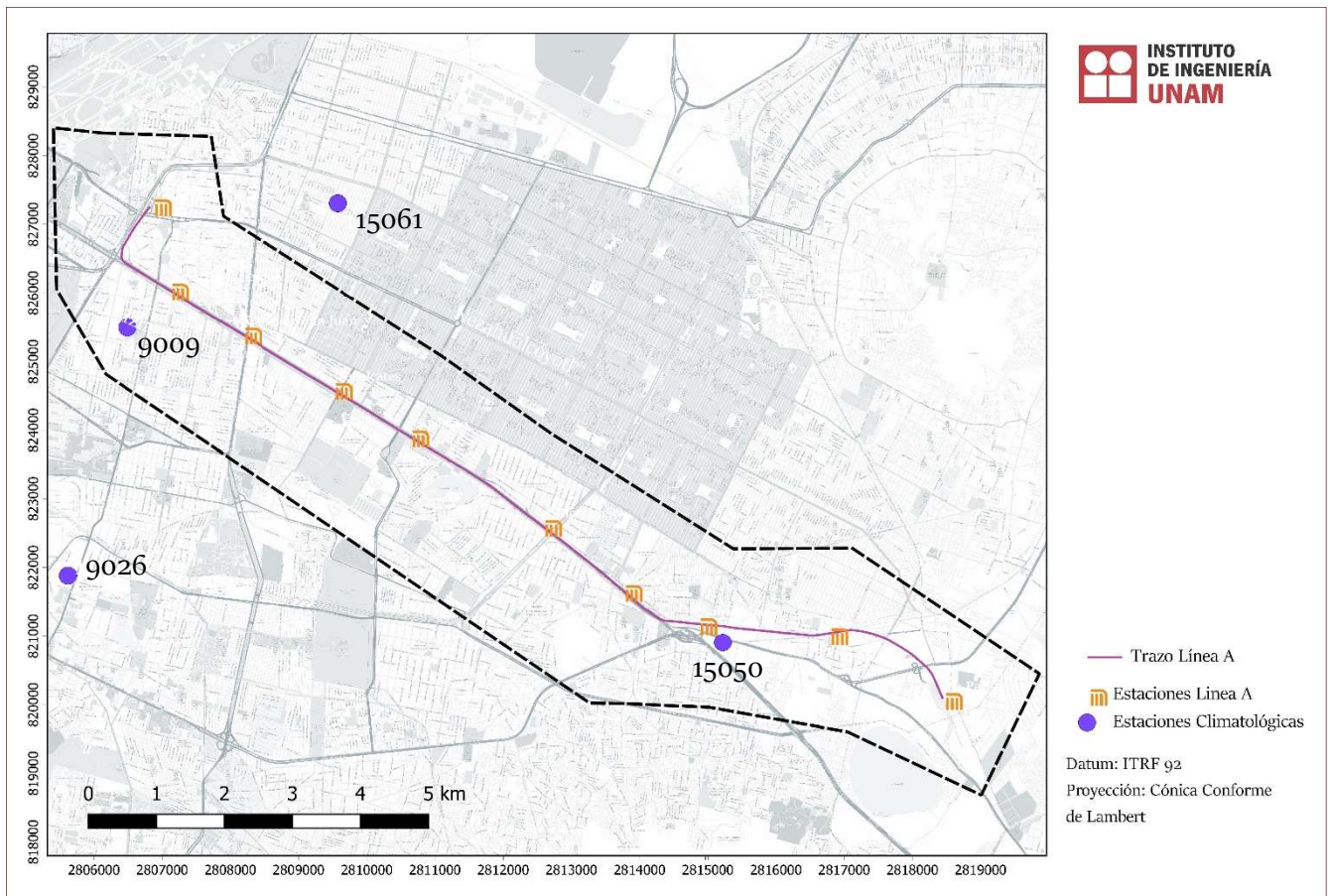


Figura 4.3.9 Ubicación de estaciones climatológicas en zona de estudio

Tabla 4.8 Detalle de estaciones climatológicas

Estación	Ubicación	Altura	Factor conectividad
9009	Agrícola Oriental	2235	0.65
9026	Morelos 77	2240	0.65
15061	Nezahualcóyotl	2278	0.65
15050	Los Reyes	2248	0.65

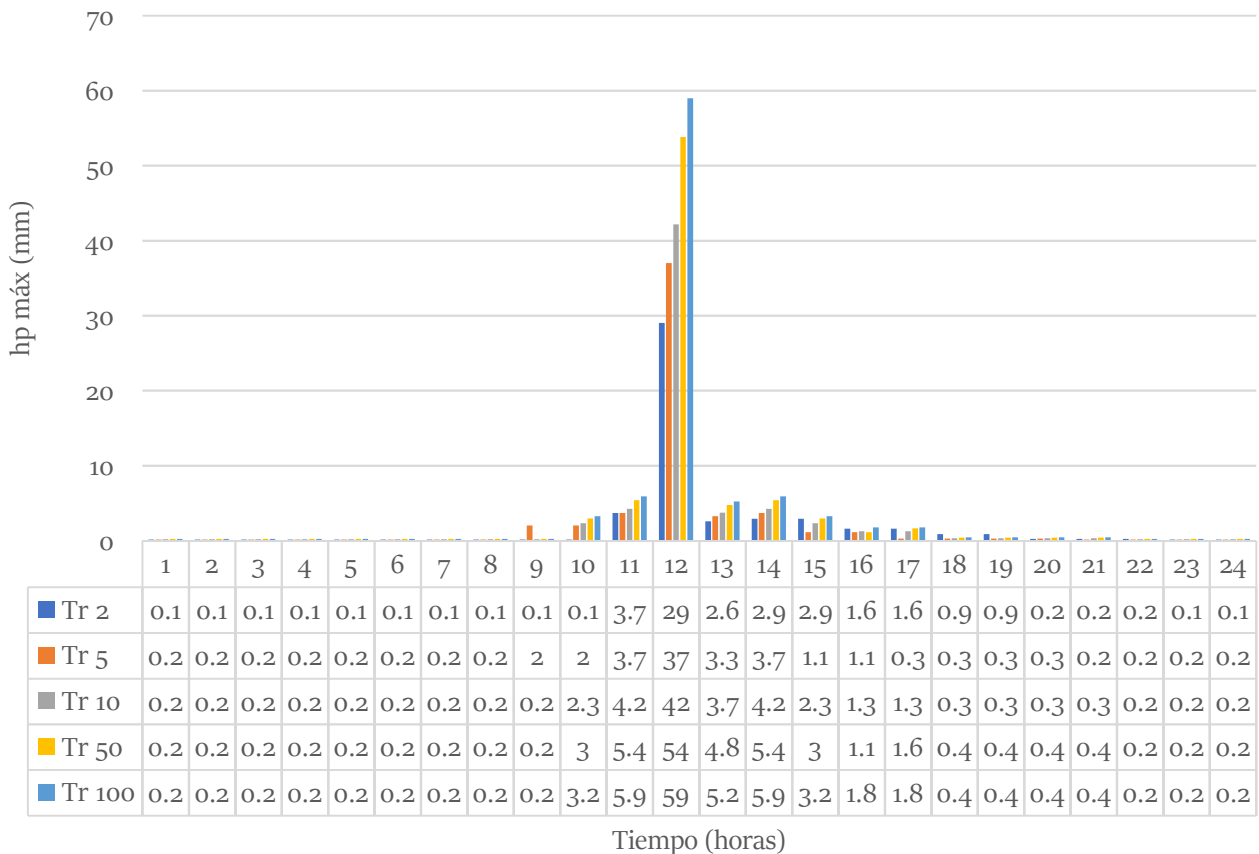


Figura 4.3.10 Hietogramas de precipitación máxima de diseño para diferentes periodos de retorno
Fuente: Estimado de mapas de lluvia CENAPRED para zona oriente de la Ciudad de México.

4.3.4.2 Información de lluvia del Observatorio Hidrológico

Para realizar la calibración del modelo y validar los resultados con la información de los mapas de lluvia proporcionados por CENAPRED, se descargó gratuitamente la medición de las estaciones del Observatorio Hidrológico en tiempo real, con mayor cercanía a la zona de estudio para una lluvia observada el día 14 de junio de 2018. Según información técnica proporcionada, las estaciones hidrometeorológicas del Observatorio tienen un radio de cobertura no mayor a 5 km, por tal motivo; se contemplaron mediciones de tres estaciones. La Figura 4.3.12 muestra el hietograma máximo en mm/h con duración de 24 horas. La decisión de realizar un hietograma con tales características es que, una vez tenidos los resultados, sea posible realizar una comparación de la información introducida al modelo y categorizar el evento sucedido.

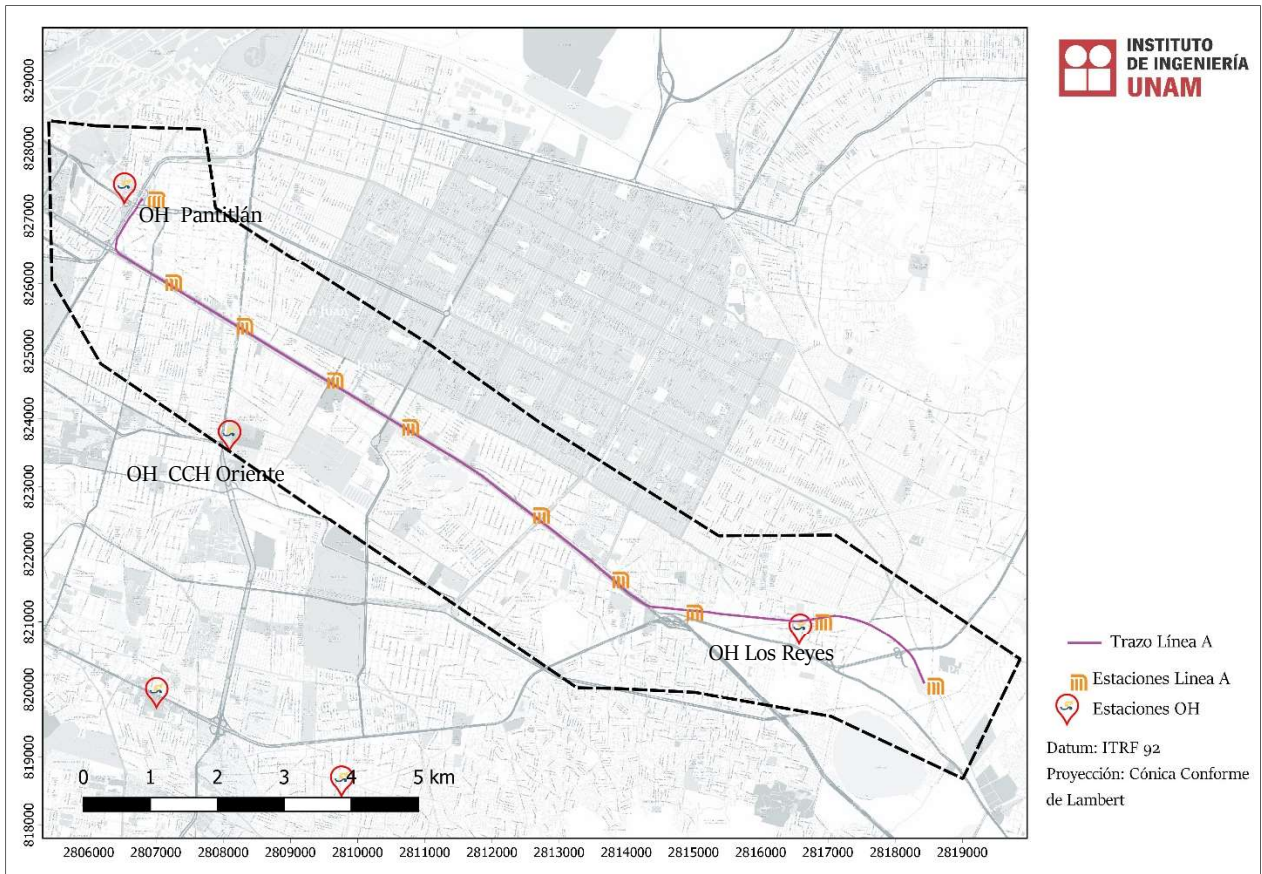


Figura 4.3.11 Ubicación de estaciones OH en zona de estudio

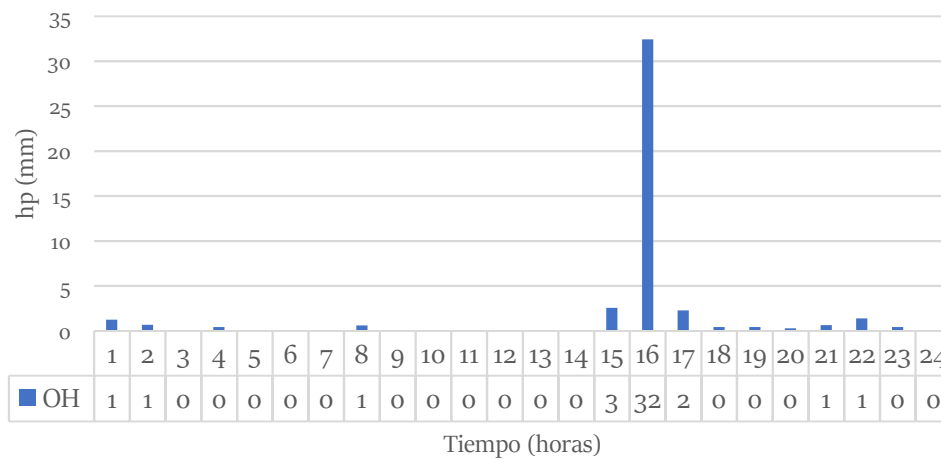


Figura 4.3.12 Hietograma de precipitación máxima para el 14 de junio de 2018

Fuente: Elaborado con datos del Observatorio Hidrológico, II UNAM

4.3.5 Histórico de inundaciones en la zona

El registro de eventos de inundación en la Línea A están vinculados a los encharcamientos de la Calzada Ignacio Zaragoza. Las características del suelo y su entorno, han propiciado daños constantes en la zona, registrados en las últimas dos décadas.

De la sección 4.3.4 se reitera que, debido a la proximidad del río de la Compañía, la zona de la estación La Paz está considerada como área de riesgo. Sin embargo, con las afectaciones por el desbordamiento aguas arriba, en localidades como Chalco e Ixtapaluca, se ejecutaron obras y acciones de protección. Por ejemplo, la estación La Paz se ubica a una distancia aproximada de 120 m, medida desde la margen del río a las escaleras de acceso. Aunado a la construcción de un muro perimetral de 4 m de altura y 40 m de distancia de la estación, que funciona como bordo de protección (Figura 4.3.8).

De los kilómetros restantes de vía, se tiene un registro mostrado en la tabla (Tabla 4.9) que sustenta la frecuencia de inundaciones. En respuesta, el Gobierno del Estado de México en conjunción con S.T.C. Metro instalaron en 2017 un colector pluvial en un tramo de la Av. Puebla y la interestación Los Reyes – La Paz de 1.20 m de diámetro y longitud de 160 m (El Universal, 2017).

Tabla 4.9 Registro histórico de la Línea A y alrededores

Fecha	Daños	Fuente
10/07/1979	30 Colonia fueron afectadas.	El Universal
30/09/1998	Inundaciones de hasta un metro y medio de altura. Afectaciones en 800 casas en 12 colonias.	La Jornada
12/06/2004	Inundación de Calz. Ignacio Zaragoza a la altura de la Colonia Vicente Villada.	El Universal
13/10/2005	Inundación de 1.20 de altura en la zona.	La Crónica
13/07/2006	Caos en Calzada Ignacio Zaragoza.	El Universal
2/07/2007	Inundación en las Estaciones Santa Marta, Acatitla, Peñón Viejo.	La Jornada
13/06/2013	Inundación en estación Los Reyes y La Paz. Alrededor de 400 casas afectadas por nivel de hasta 1.5 m.	La Jornada
06/09/2013	Inundación entre 60 y 1.5 m de altura. Afectación en al menos 20 colonias.	Excélsior
14/06/2018	Inundación en la periferia de las estaciones Peñón Viejo, Acatitla, Santa Marta, Los Reyes y La Paz. Un muerto por caída a coladera.	El Universal
30/08/2018	Inundaciones en la periferia de las estaciones Santa Marta.	La Jornada

En la *Figura 4.3.14* se muestra el registro histórico de encharcamientos en la zona según el Atlas de Riesgo de la Ciudad de México, para el periodo 2016 a 2018. En todos los casos los datos especifican que los eventos monitoreados ocurrieron por la precipitación intensa.

Lluvia del 14 de junio de 2018

Desde la tarde del 13 de junio, la Ciudad de México tuvo registros de precipitación ligera, incluso en las primeras horas del día siguiente. El jueves 14 de junio, alrededor de las 16:00 horas, se registró una lluvia con intensidad máxima de 92 mm⁸ durante 15 minutos (*ver Figura 4.3.14a, 4.3.14b*). La lluvia provocó la inundación de la Calzada Ignacio Zaragoza y la suspensión del servicio en las estaciones Peñón Viejo, Acatitla, Santa Marta, Los Reyes y La Paz, de la Línea A. Algunos usuarios desesperados caminaron sobre la avenida para llegar a sus hogares y los automovilistas detuvieron sus vehículos al no poder circular por inundaciones que alcanzaron hasta el metro de altura, medido en las cercanías a la estación Los Reyes. En el Distribuidor Vial la Concordia, el agua llegó hasta 60 cm de tirante y un espejo de 250 metros, imposibilitando el acceso al puente. En los carriles centrales y laterales de Calzada Ignacio Zaragoza y el cruce con Av. República Federal, la altura del agua se midió hasta medio metro y 300 m de longitud. La *Tabla 4.10* muestra las cifras oficiales publicadas en el Atlas de Riesgo de la Ciudad de México. Las afectaciones cobraron la vida de un menor de 14 años, que cayó en una coladera cerca del acceso al puente La Concordia. En los alrededores de la estación Los Reyes, 414 casas se inundaron; de las cuales 252 el agua cubrió entre 80 y 100 cm de altura. Según notas periodísticas, la zona más afectada se localizó donde un año atrás se habían concluido las obras del colector.

“En el 2017 concluyeron los trabajos de obras de drenaje para mitigar los riesgos de inundaciones en la zona abierta de la Línea A, donde se invirtieron 25 millones de pesos provenientes del Fondo Metropolitano; sin embargo, en ese punto se registró la mayor afectación...” (El Universal, 15 junio 2018)

De las 16 alcaldías de la Ciudad de México, 8 mostraron afectaciones hasta con tirantes de 50 cm; por ejemplo, en Cuauhtémoc, donde hay reportes por anegaciones en San Antonio Abad y Lucas Alamán, colonia Obrera; espejo de 50 m y tirante 30 cm; Reforma al oriente y Bucareli, colonia



Figura 4.3.13 Inundación en acceso al Puente La Concordia

Fuente: Excélsior, 2018

⁸ Datos obtenidos de la Estación Los Reyes del Observatorio Hidrológico




Centro; espejo de 50 m y tirante 15 cm; bajo puente de Boturini y San Antonio Abad, colonia Obrera; espejo 50 m y tirante 30 cm.

Tabla 4.10 Registro de tirantes cercanos a Línea A
Fuente: Atlas de Riesgo de la Ciudad de México, 2018

Número	Ubicación	Tirante (m)	Longitud (m)
1	Zaragoza y Guelatao Poniente-Oriente	0.25	100
2	Zaragoza y Guelatao Oriente-Poniente	0.3	200
3	Zaragoza y República Federal	0.5	300
4	Zaragoza y Cayetano Andrade (Metro Acatitla)	0.6	250
5	Metro Santa Marta	1.2	200
6	Metro Los Reyes	1	1000

Al respecto, con el cambio de administración en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, en junio del presente año publicó la localización de 63 puntos con mayor recurrencia de encharcamiento, como parte del Operativo de Lluvias 2019. Del total de puntos reportados, al menos 5 se encuentran en la zona de estudio. Algunos de ellos están clasificados como lugares de alta incidencia. En la información no se especifica que rangos se tomaron para determinar la categoría, pero, el objetivo es que las zonas en color rojo (*Tabla 4.11 y Figura 4.3.15*) sean prioritarias para la ejecución de obras.

Tabla 4.11 Clasificación de recurrencia de encharcamientos
Fuente: SACMEX, 2019

Color	Clasificación
	Alto
	Medio
	Bajo

Toda la información estadística recabada acerca de inundaciones anteriores será tomada en cuenta durante la evaluación de vulnerabilidad. El registro del evento seleccionado se eligió por la disponibilidad de información y registros, aun cuando durante el 2018 existieron otros eventos de inundación en la zona.



Figura 4.3.14 Registro de lluvia 14 junio 2018 a) Intensidad de precipitación b) Precipitación acumulada
Fuente: Observatorio Hidrológico UNAM, 2018

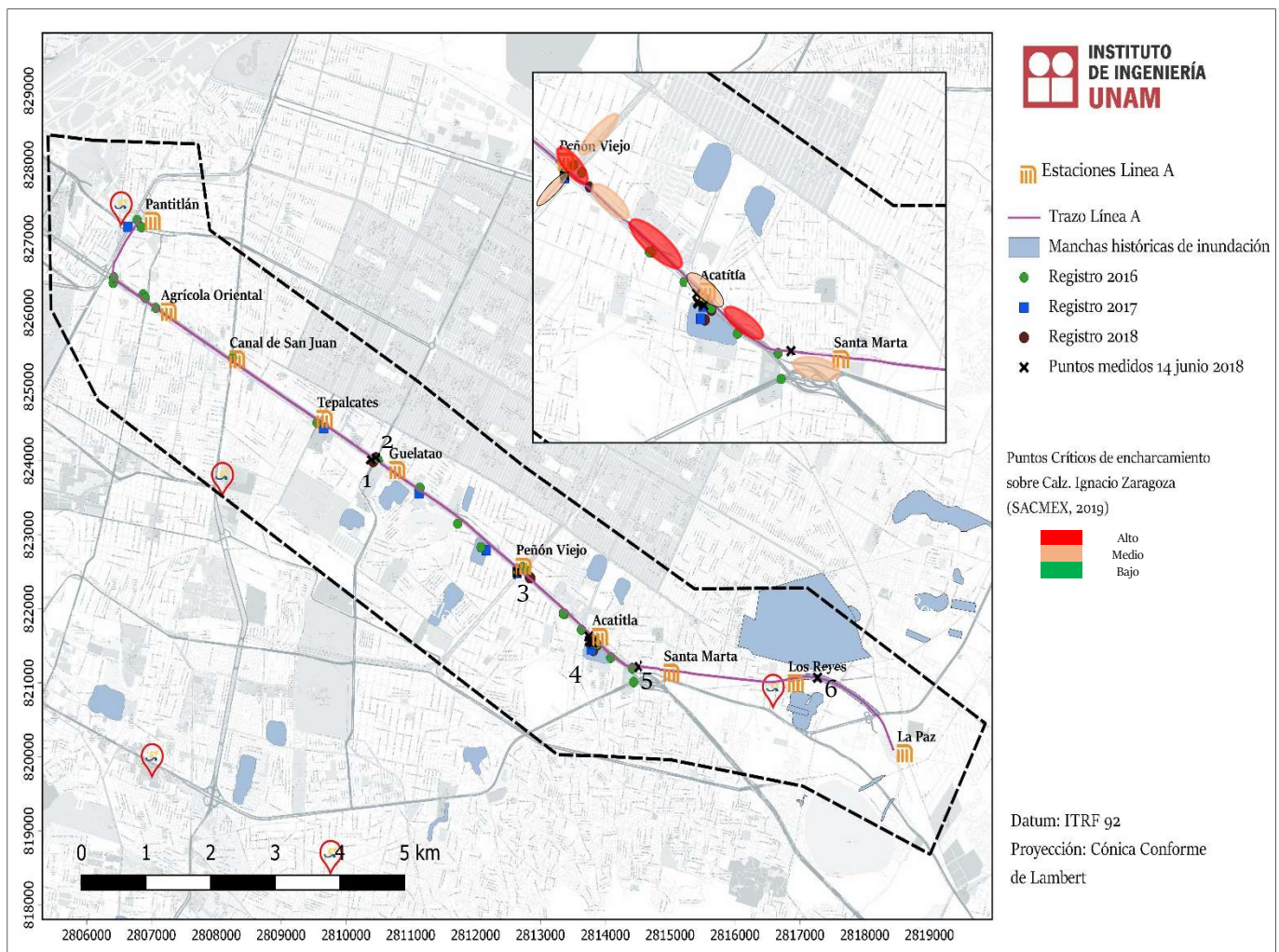


Figura 4.3.15 Ubicación de encharcamientos Calz. Ignacio Zaragoza
Fuente: ARCDMX, 2018; SACMEX, 2019

Capítulo 5



Acatiltán "entre las cañas"

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las modelaciones hidrodinámicas y la implementación de la metodología de vulnerabilidad para periodos de retorno en 2,5,10,50 y 100 años, con una duración de 24 horas.

5.1 Simulación Hidrodinámica

La ejecución de la simulación resultó del compilado de datos para el cálculo de infiltración y la generación de hietogramas. El tiempo de simulación fue de 24 horas, guardando datos cada 60 minutos. Las simulaciones se llevaron a cabo en un sistema Intel® Core™ i5-7200 U CPU @ 2.50 Ghz y 12 GB en memoria RAM. Esta opción se realizó contemplando el análisis sugerido por Courty y Pedrozo-Acuña (2018), tomando los siguientes parámetros en Itzi:

Tabla 5.1 Parámetros Itzi

Δt_{\max}	5 s
α	0.7
θ	0.7
u_r	0.1 m/s
hf_{\min}	0.005 m

La información recabada para la simulación hidrodinámica se integró en distintas resoluciones de ráster (mostradas en la *Tabla 5.2*) debido a que Itzi recomienda que, para evitar errores volumétricos e inestabilidades numéricas durante la simulación, el DEM tenga una resolución mínima; en tanto las características de suelo para el cálculo de infiltración y uso de suelo sean celdas mayores de acuerdo a la distribución espacial de la zona.

Tabla 5.2 Características de información

Dato	Resolución (m)	Fuente
Modelo Digital de Elevación	5 x 5	CEM INEGI 2018
Precipitación diseño	1000 x 1000	CENAPRED,2014
Infiltración	250 x 250	Soil Grids, 2018
Uso de suelo	30 x 30	GLC30, 2017
Precipitación validación	1000 x 1000	OH, 2018

Los hietogramas de diseño se ejecutaron a partir de la información de las estaciones rellenadas e interpoladas por medio de Kriging, a una resolución de 1 km, según la cobertura de medición en las estaciones. El mismo procedimiento se realizó con la información de las estaciones OH, en todos casos para una duración de 24 horas cada 60 min.

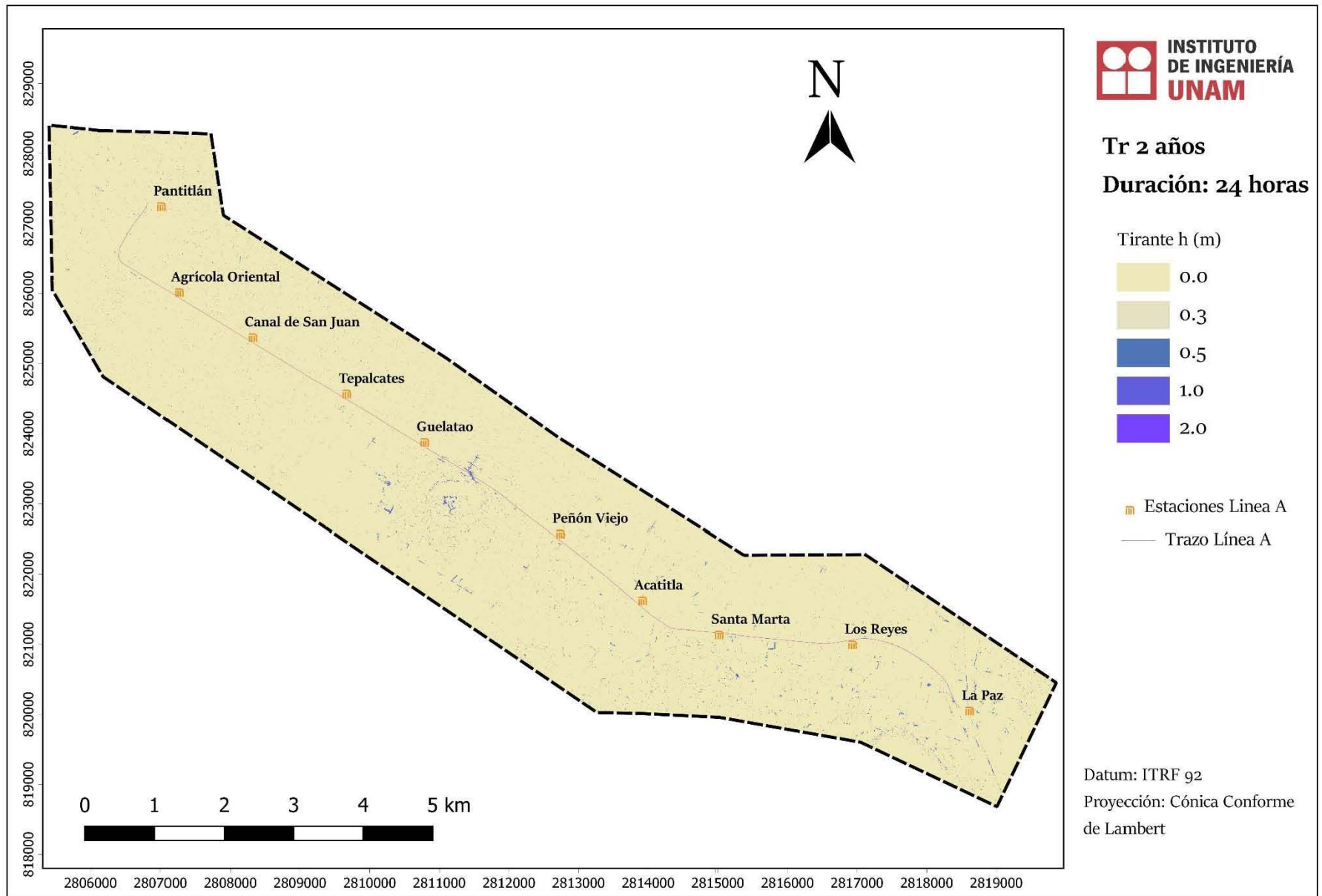


Figura 5.1.1 Tirante máximo para Tr 2 años

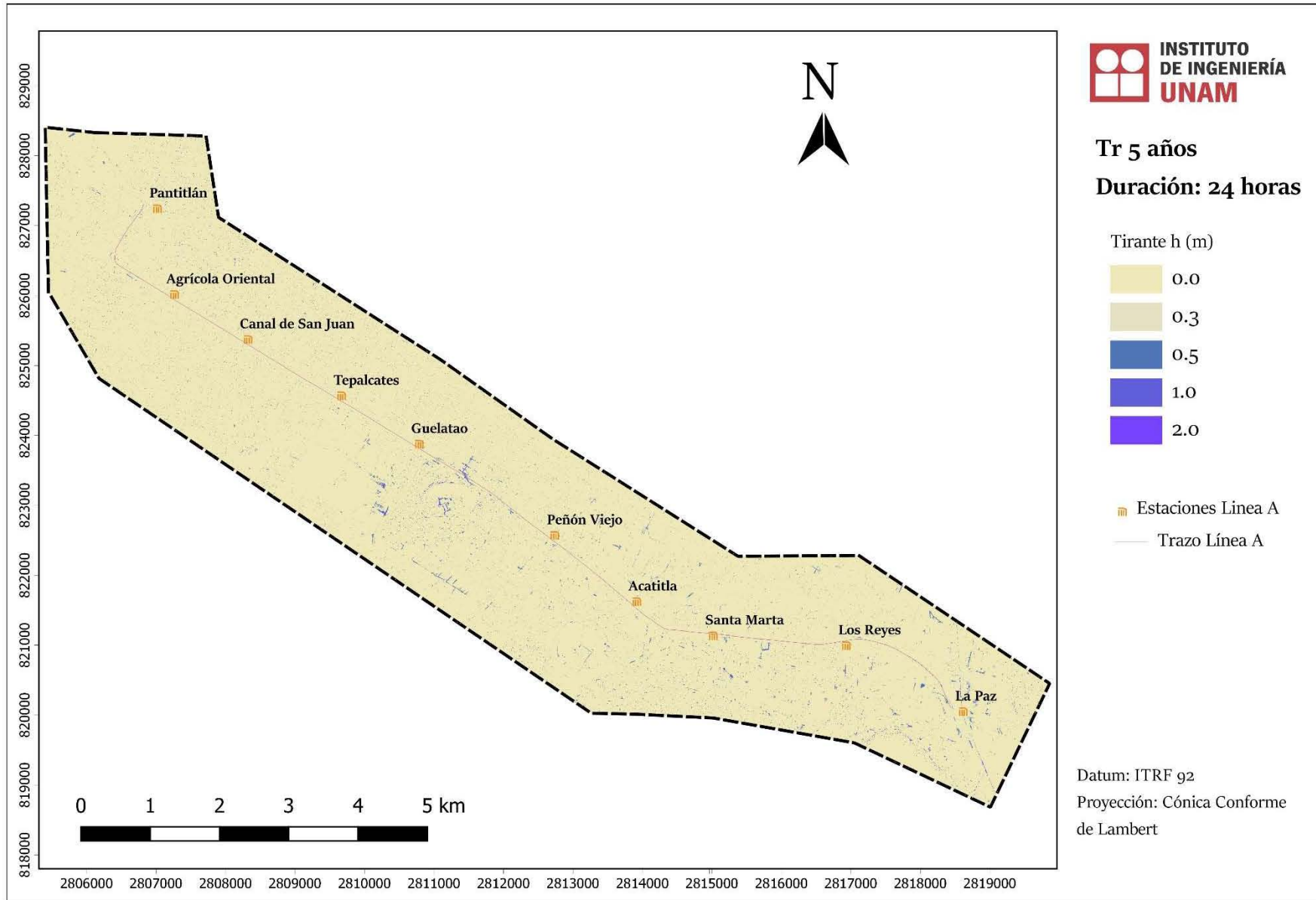


Figura 5.1.2 Tirante máximo para Tr 5 años

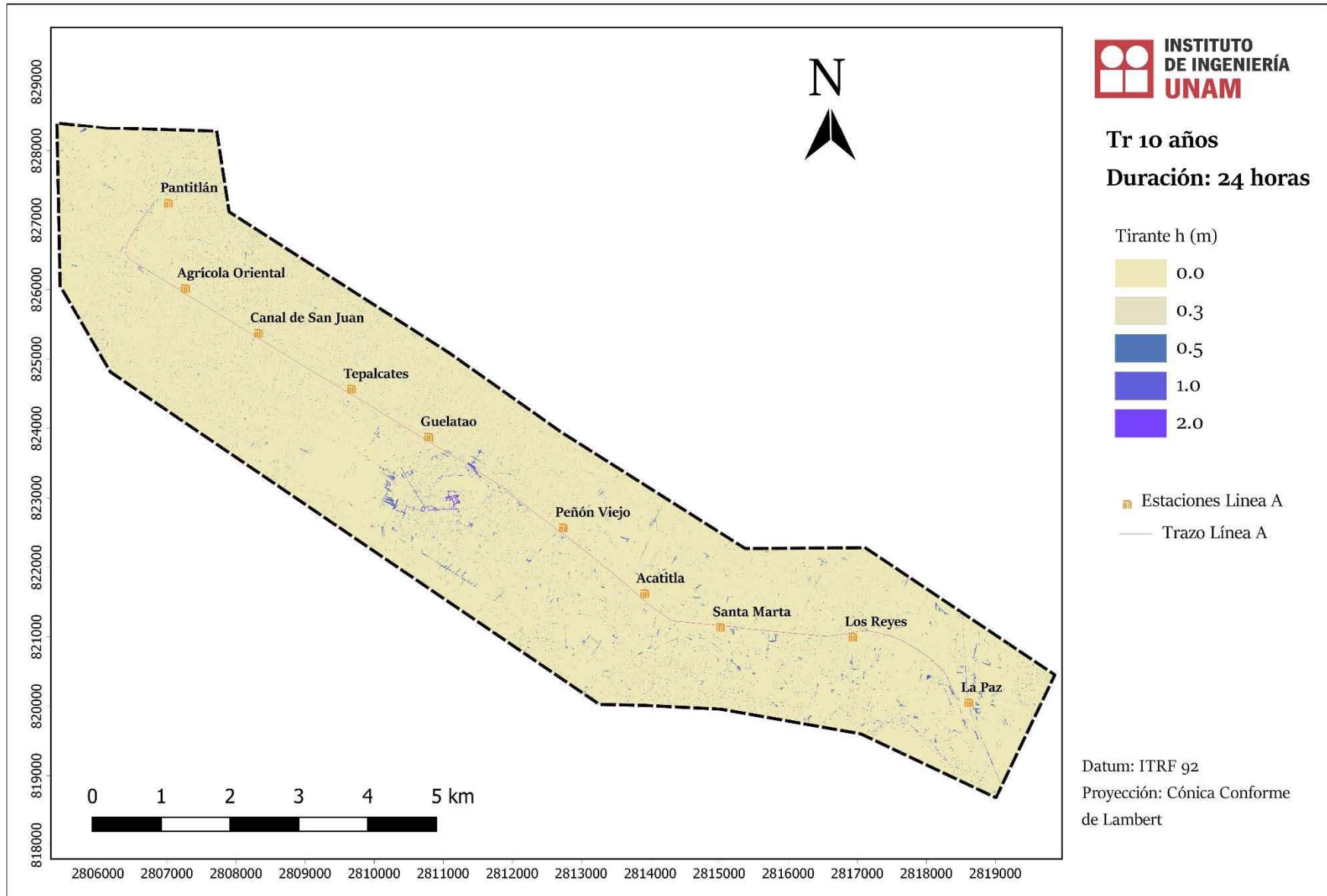


Figura 5.1.3 Tirante máximo para Tr 10 años

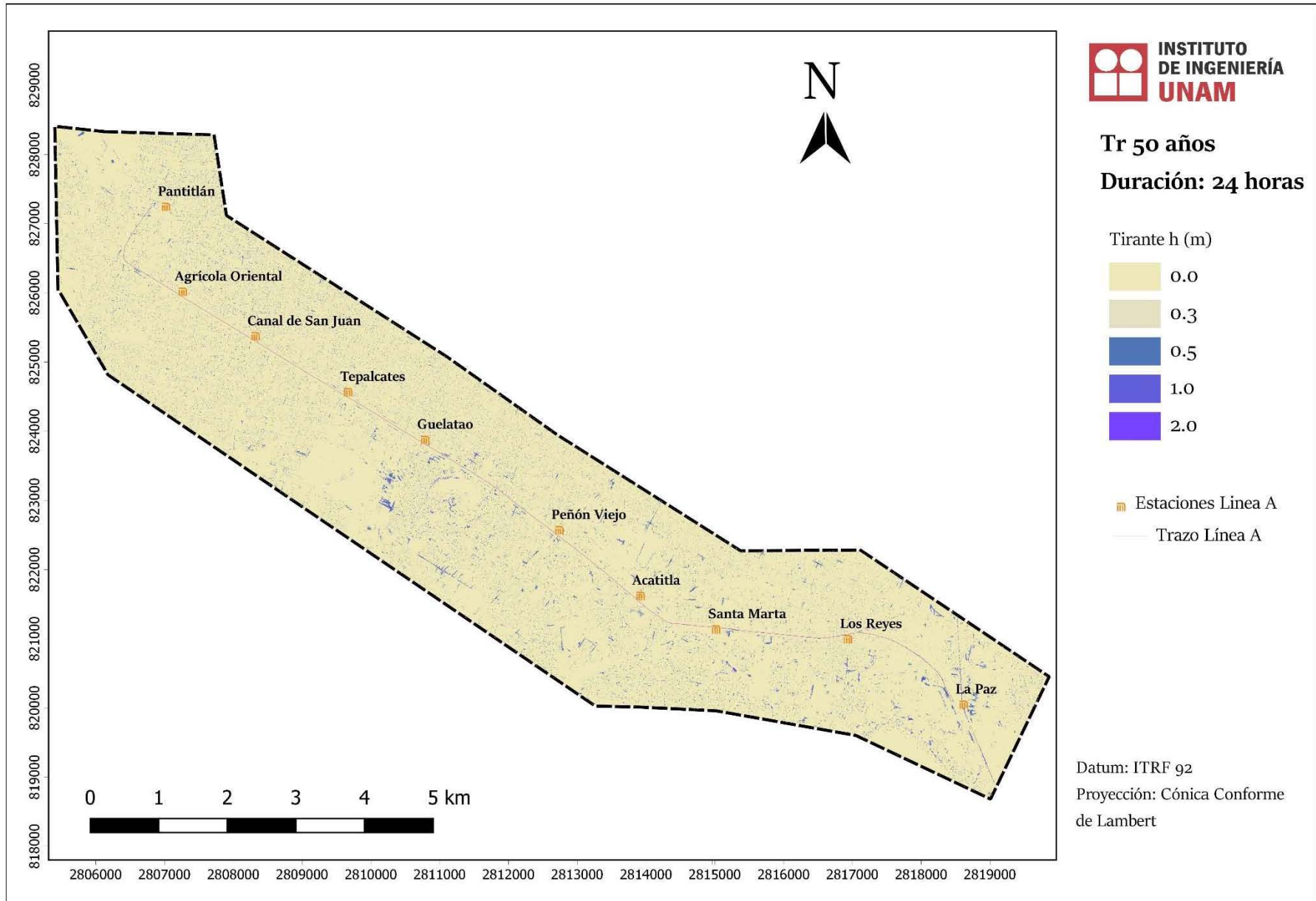


Figura 5.1.4 Tirante máximo para Tr 50 años

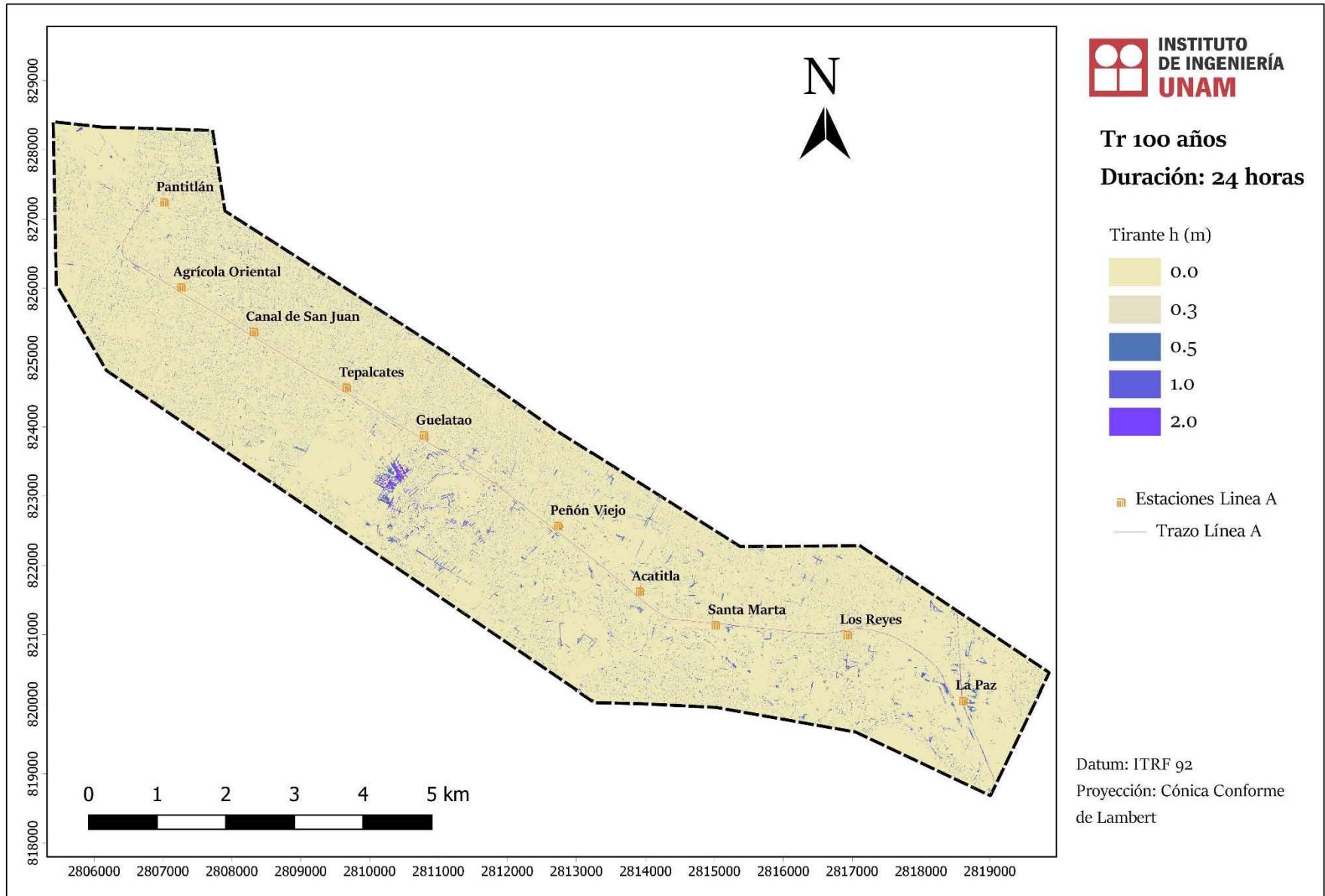


Figura 5.1.5 Tirante máximo para Tr 100 años

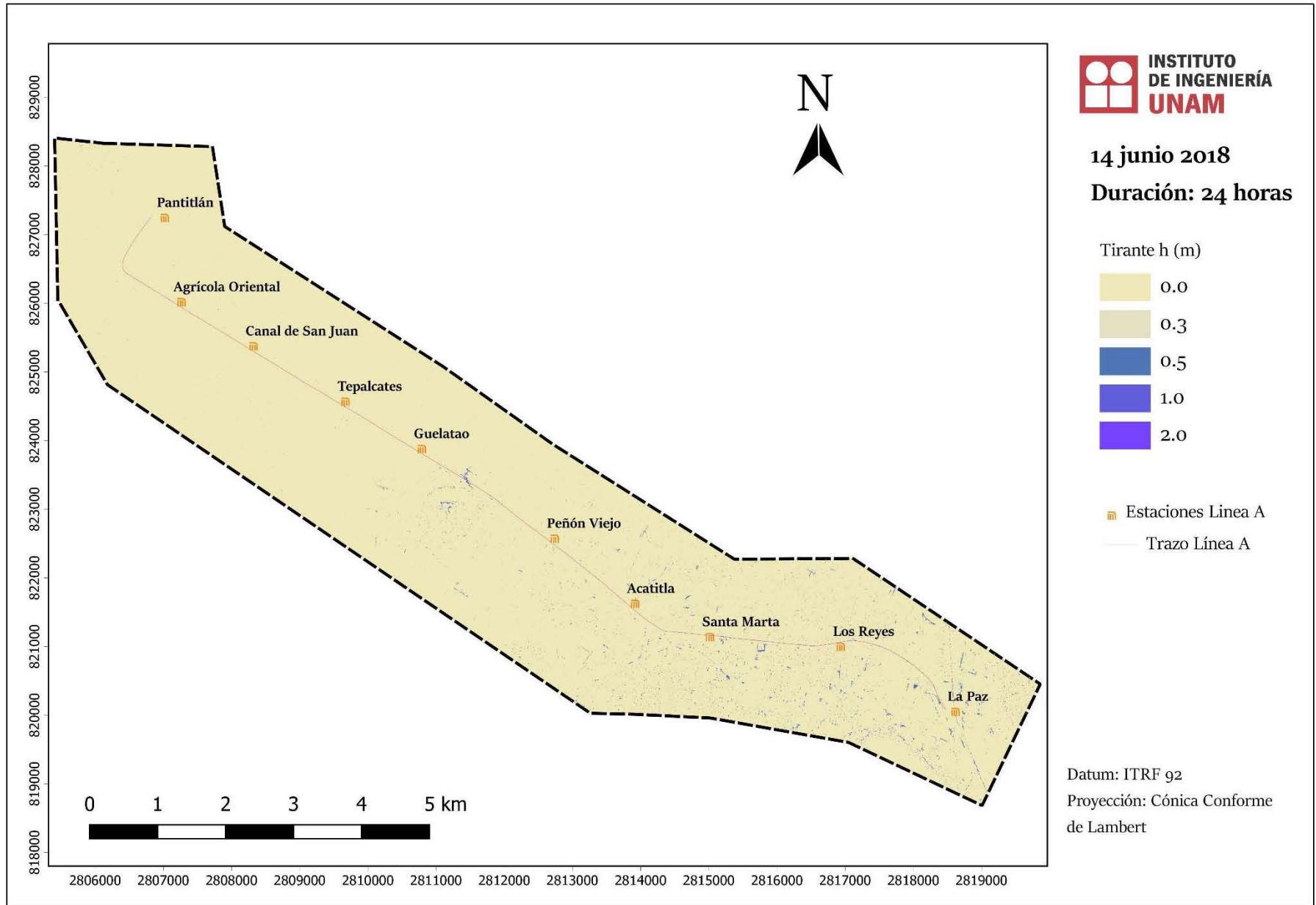


Figura 5.1.6 Tirante máximo para la lluvia del 14 de junio 2018

El estudio se realizó bajo la combinación del enfoque escenario-estadístico, a partir de las lluvias de diseño y la información histórica de los eventos. De las simulaciones obtenidas (*Figuras 5.1.1 – 5.1.5*) se observan manchas de inundación coincidentes para todos los periodos de retorno entre la intersección Guelatao- Peñón Viejo, Acatitla-Santa Marta y en los alrededores de la estación La Paz; según la magnitud del periodo. En la simulación a 100 años periodo de retorno (*Figura 5.1.5*), caso más desfavorable, es posible visualizar tirantes superiores a 1 metro de altura; principalmente en paralelo hacia el sur de la estación Guelatao. Los efectos de escurrimiento desde la parte alta del Peñón Viejo y su costado sesgado del sur, propician el flujo hacia el poniente, coincidente con el histórico de inundaciones en la zona (*Figura 4.3.15*). Lo mismo se observa en la parte suroriente del área, cercana a la estación La Paz; donde los tirantes resaltan el trayecto del Canal de la Compañía. De los resultados obtenidos es importante señalar que todas las simulaciones se realizaron sin las características de drenaje y la aportación del Canal. Con estas consideraciones se pretende estimar si la precipitación es la principal causa de inundación.

5.1.1 Calibración y validación

Con apoyo de los puntos obtenidos en el ARCDMX, se revisaron los tirantes generados para cada periodo de retorno (*Figura 5.1.7*). La *Tabla 5.3* muestra valores próximos relativos entre el tirante medido y el máximo calculado durante la lluvia del 14 de junio. Estos resultados contienen fluctuaciones producto de las características del DEM, información del suelo, precipitación y la incertidumbre habitual de los modelos.

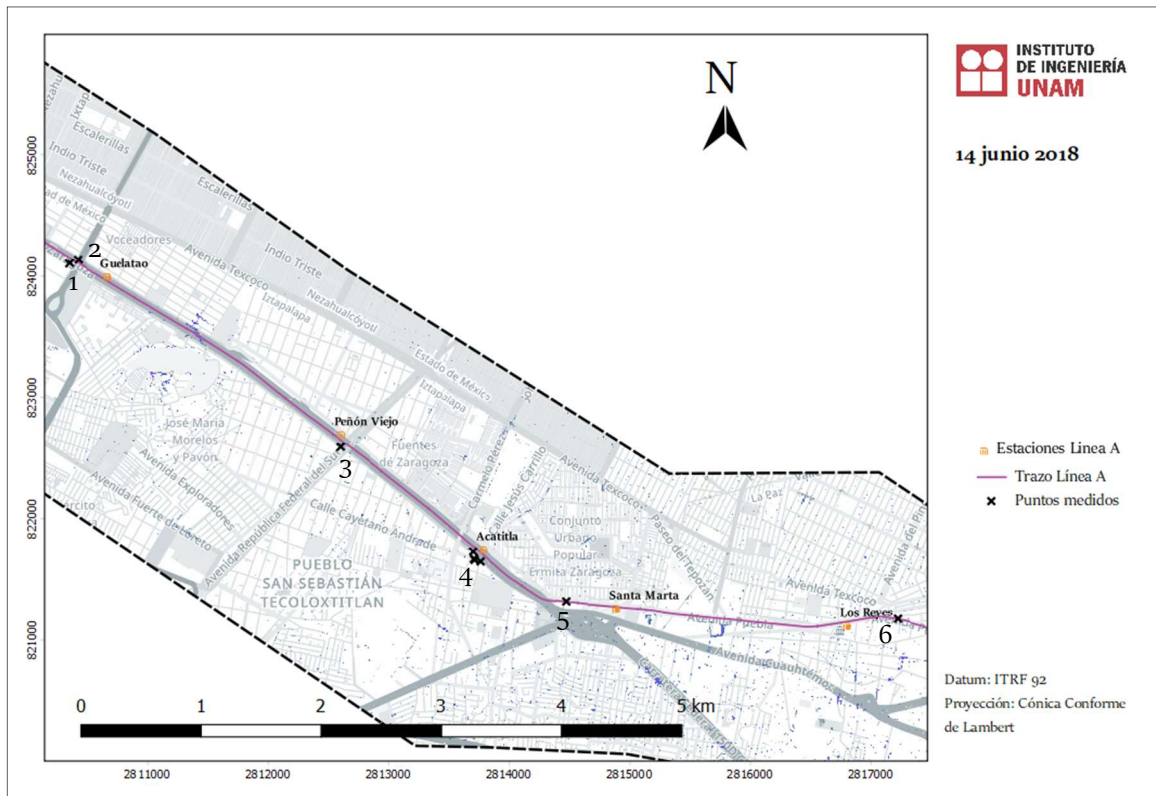


Figura 5.1.7 Puntos medidos 14 junio 2018

Tabla 5.3 Tirantes máximos calculados para distintos periodos de retorno

Número	Ubicación	h medido (m)	h máx calculado (m)	h Tr 2 (m)	h Tr 5 (m)	h Tr 10 (m)	h Tr 50 (m)	h Tr 100 (m)
1	Zaragoza y Guelatao Poniente- Oriente	0.25	0.2	0.46	0.49	0.52	0.56	0.75
2	Zaragoza y Guelatao Oriente- Poniente	0.3	0.29	0.16	0.33	0.35	0.5	0.59
3	Zaragoza y República Federal	0.5	0.75	0.82	0.87	0.94	0.95	1.03
4	Zaragoza y Cayetano Andrade (Metro Acatitla)	0.6	0.61	0.85	1.022	1.07	1.15	1.19
5	Metro Santa Marta	1.2	1.47	1.65	1.67	1.86	1.92	1.95
6	Metro Los Reyes	1	0.94	0.44	0.51	0.56	0.62	1.06

La Figura 5.1.8 muestra un gráfico comparativo entre tirantes obtenidos con la lluvia de diseño en distintos periodos de retorno y los ocasionados durante la lluvia del 14 de junio de 2018. Se aprecia una evolución congruente a medida que la lluvia de diseño aumenta en el tiempo en los puntos 1,3,4,5 y por encima de las alturas registradas.

De las mediciones en Calzada Zaragoza y Guelatao en sentido de Oriente a Poniente, el tirante registrado durante el evento es de 0.3 m; sin embargo, durante la modelación para una lluvia con periodo de retorno de 2 años, el tirante máximo generado se encuentra por debajo del medido, y para los periodos restantes, no existe anomalía alguna. Lo mismo ocurre en el punto de aforo cercano al Metro Los Reyes (punto 6) donde el tirante simulado de 100 años se aproxima a la altura registrada. En ambos casos, el diferencial ocurrido se explica por distintos factores como errores en la simulación, ya sea por la deficiencia del DEM que ocasiona inestabilidad numérica, valores erróneos de infiltración; o inexactitud en las mediciones pluviométricas e interpolación. No obstante, la similitud en otros puntos para un h máximo calculado y h medido, desestima la posibilidad de error y sugiere que el problema refleja la incapacidad de la red de drenaje en la zona.

El diferencial entre la lluvia medida en tiempo real y las lluvias de diseño, es aceptable, ya que las últimas se estimaron con datos históricos de estaciones cercanas; incluyendo que los tirantes propiciados por algunos hietogramas, sean subestimados por diversos factores incluyendo el efecto del cambio climático.

Realizando un análisis de error (Figura 5.1.9) de la simulación y el evento observado, se explica que al no existir dispersión entre valores con magnitud cercana a cero y no rebasar el 10% de error, la simulación tiene 67% de certeza. En el punto 1 la distancia entre el valor de calibración y la simulación especifica que el tirante para distintos periodos es sobreestimado, comprobado por el error superior al 80%. En otro sentido, el punto de aforo en el cruce de la Calzada Zaragoza y Cayetano Andrade, la sobreestimación del tirante para la lluvia de diseño de 2 años es del 40%.

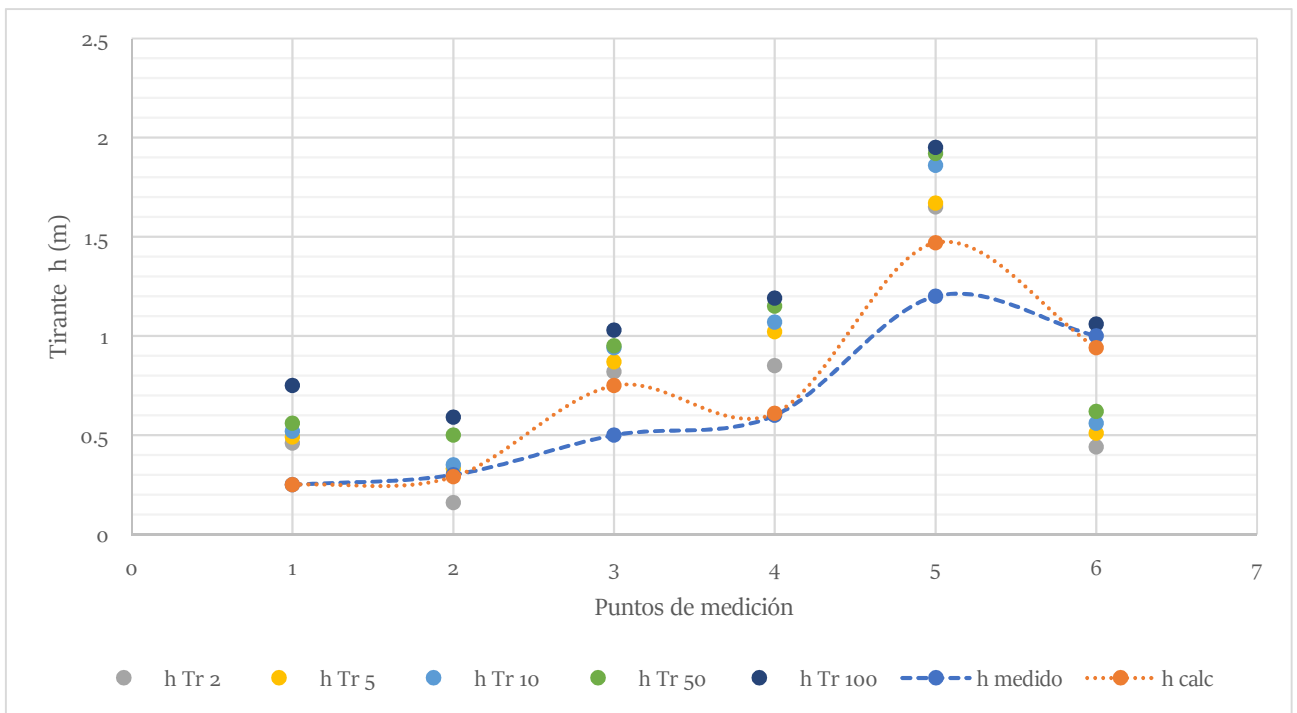


Figura 5.1.8 Comparativo de tirantes respecto al medido

La mayoría de los puntos donde el valor de tirante calculado y medido distan, es posible que la incertidumbre se encuentre durante el aforo; puesto que, en más de la mitad de los sitios, el tirante es reproducido a partir de la lluvia medida. El cálculo del porcentaje de error relativo se calculó utilizando el valor de h calculado, permitiendo que la evaluación se ejecute bajo la condición de áreas no drenadas, con la siguiente expresión:

$$\%Error\ relativo = \left| \frac{h\ calc - h\ Tr_i}{h\ calc} \right| \quad (11)$$

En relación a la magnitud del evento, la gráfica de errores determina que existe mayor tendencia hacia una inundación provocada por tirantes de un Tr entre 2 y 5 años.

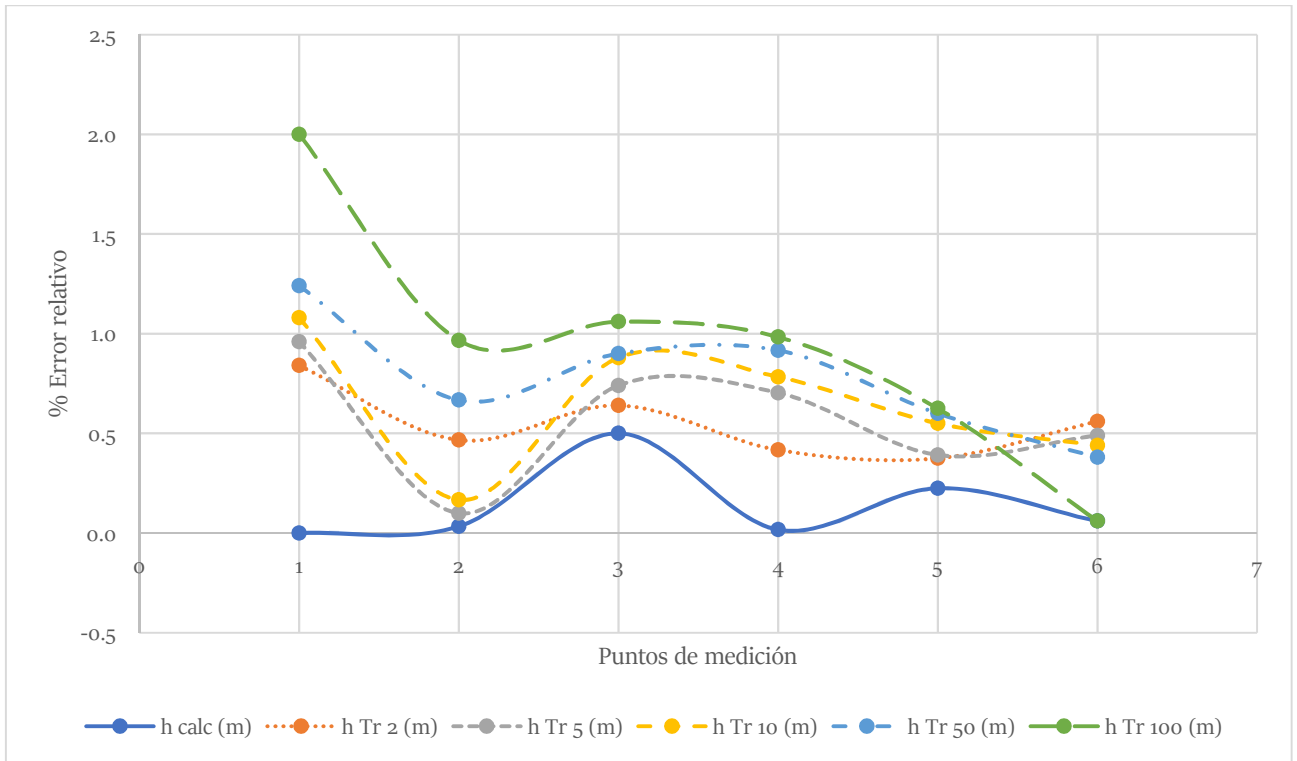


Figura 5.1.9 Error relativo entre tirantes

Por otra parte, con la información de las celdas de la simulación (p. ej. para Tr 2 años, *Tabla 5.4*), se calcularon las métricas en los distintos mapas de inundación (*Tabla 5.5*). Se llamará a la simulación del tirante calculado (lluvia del 14 de junio de 2018) como simulación observada, para obtener la comparación de píxeles.

Tabla 5.4 Número de celdas para Tr 2 años

	Si (3)	No(2)	Suma
Si(1)	74868	10220	85088
No(0)	9412	350868	360280
Suma	84280	361088	445368

En cuanto a la tasa de éxito (HR), obtenida a partir de las distintas simulaciones, existe una porción de los eventos que coinciden con las celdas de calibración. Esto significa que al encontrarse el valor más cercano a 1, la simulación tiene el mismo número de celdas inundadas que lo observado. Por su parte, existieron celdas que no se presentaron durante lo observado, determinado por FAR >1.

Tabla 5.5 Métricas en distintos periodos de retorno

Métrica	Tr 2	Tr 5	Tr 10	Tr 50	Tr 100
HR=	0.87	0.97	0.99	0.96	0.96
FAR=	1	1	1	1	1
FB=	0.99	2.28	3.07	4.58	5.6
CSI=	0.79	0.42	0.32	0.2	0.17

En todos los casos se registra un sesgo, explicado como sobreestimación ($FB > 1$) y subestimación del evento ($FB < 1$). De la Tabla 5.5 el Tr de 2 años se percibe como evento equilibrado al tender dicho valor a 1. El índice de éxito (CSI) demuestra que la simulación de TR 2 años tiene mayor precisión en el modelo, diferenciado del resto de los periodos de retorno analizados.

5.1.2 Discusión de resultados

Inicialmente los hietogramas de diseño de 2 y 5 años estiman una lluvia máxima de 29 y 37 mm/h respectivamente (*Figura 4.3.10 y 4.3.12*). En cambio, la lluvia máxima del 14 de junio registró 32 mm/h, por lo cual la intensidad se encuentra acotada durante los hietogramas mencionados. También se entiende que la variación entre los tirantes calculados y medidos tienen cierto grado de error debido a que la simulación no integró la red de drenaje de la zona. A pesar de ello, el modelo se entiende como calibrado al determinar que algunos puntos como 1,2,4 y 6 dieron valores aproximados a los valores medidos, limitando la incertidumbre del modelo. Los errores observados en los tirantes calculados tendientes a cero confirman la falla en el drenaje local, debido a las consideraciones descritas. Con respecto a las métricas, existe hasta en 74% de certidumbre que la mancha de inundación del hietograma de diseño para 2 años está relacionada con la lluvia observada. Por lo tanto, bajo las consideraciones del análisis de los tirantes y las métricas, es probable que la inundación producida el 14 de junio de 2018 está relacionada con la incapacidad del drenaje de algunas zonas; ya sea por factores de hundimiento, basura o falta de dimensiones.

5.2 Mapas de vulnerabilidad

Una vez que el modelo está calibrado, es posible realizar los mapas de vulnerabilidad en la zona de estudio. El objetivo principal de dichos mapas es determinar las áreas con mayor propensión a ser inundadas de acuerdo al criterio descrito, y con ello realizar una propuesta de mitigación.

Así pues, se presentarán los resultados obtenidos de la metodología de InaSAFE, que estima los tramos de la Línea A cercanos a zonas de encharcamiento e inundación. Los mapas se realizaron para los periodos de retorno en 2, 5, 10, 50 y 100 años; este último como el caso más severo. La Tabla 5.6 resume las estaciones con mayor vulnerabilidad de inundación por periodo de retorno, en un radio de 100 m.

Tabla 5.6 Vulnerabilidad de inundación por estación

	Pantitlán	Agrícola Oriental	Canal de San Juan	Tepalcate	Guelatao	Peñón Viejo	Acatitla	Santa Marta	Los Reyes	La Paz
Tr 2										
Tr 5										
Tr 10										
Tr 50										
Tr 100										

Donde:

Tabla 5.7 Clasificación de Tirante

Clasificación	Altura h (m)
Alto	$h \geq 1.5$
Medio	$0.5 \leq h < 1.5$
Bajo	$0.3 \leq h < 0.5$
Nulo	$h < 0.3$

De las Figuras 5.21 a 5.2.5 se muestra un mapa general de vulnerabilidad, donde se observa los lugares con mayor exposición e impacto a inundación. Para el Tr 2 años, los rangos no superan el nivel medio de altura y en ningún caso la vulnerabilidad es alta. Con Tr 5 años, existe alta vulnerabilidad de la vía de rodamiento cercana a la estación Santa Marta; que puede cotejarse con la *Tabla 5.6*. En el caso más desfavorable, donde Tr es 100 años; se observa que la mayor parte de la vía de rodamiento está expuesta a inundaciones, al menos en un rango de baja vulnerabilidad con tirantes entre 30 y 50 cm. El caso del punto cercano a la estación Santa Marta demuestra que en cualquier periodo de retorno la vulnerabilidad es alta, producto del túnel a desnivel. Esto propicia que, ante la falla del drenaje; el agua ingresa con facilidad a la vía, tal como se ha reportado en eventos de inundación anteriores.

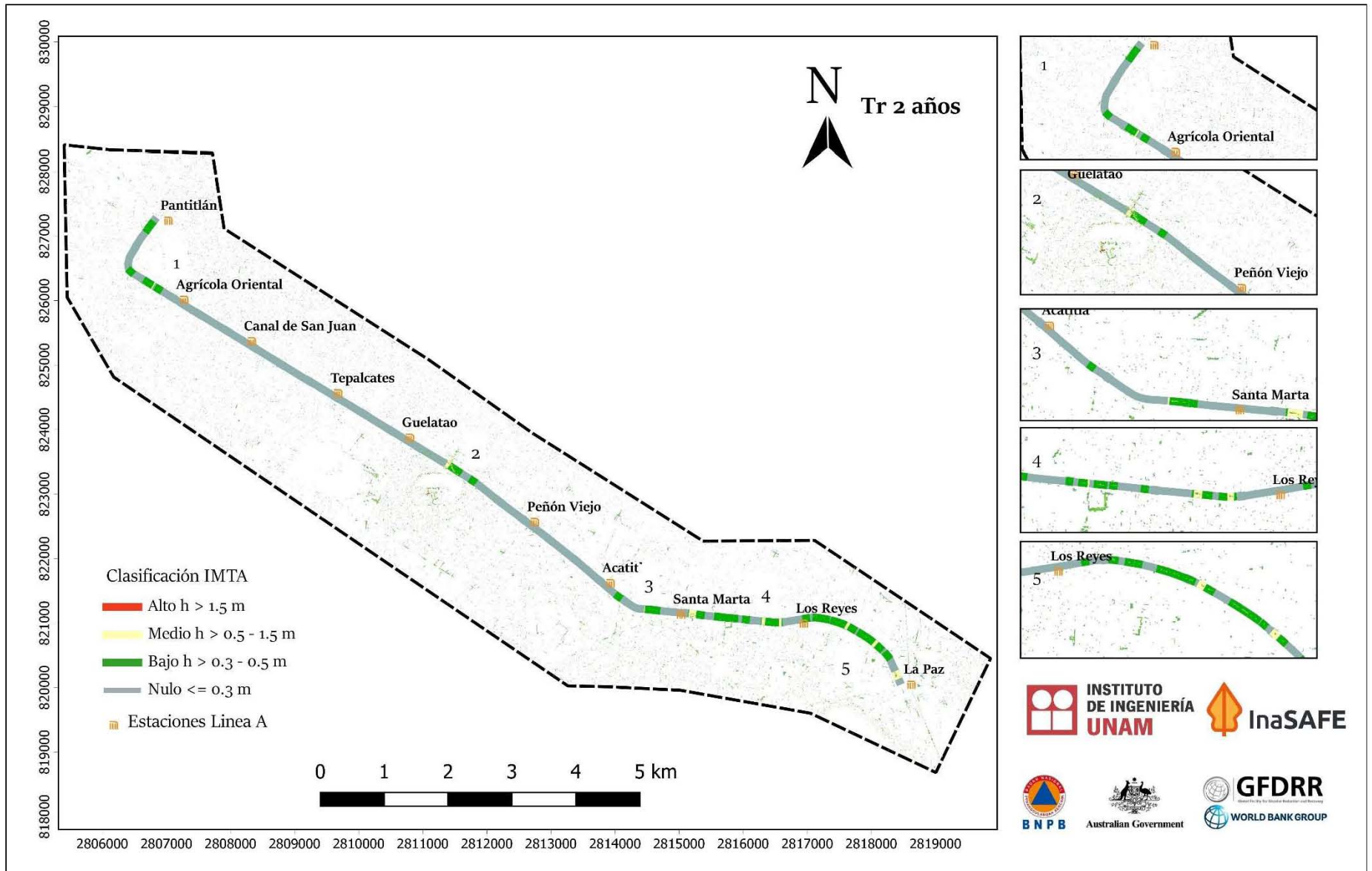


Figura 5.2.1 Vulnerabilidad en la zona para Tr 2 años

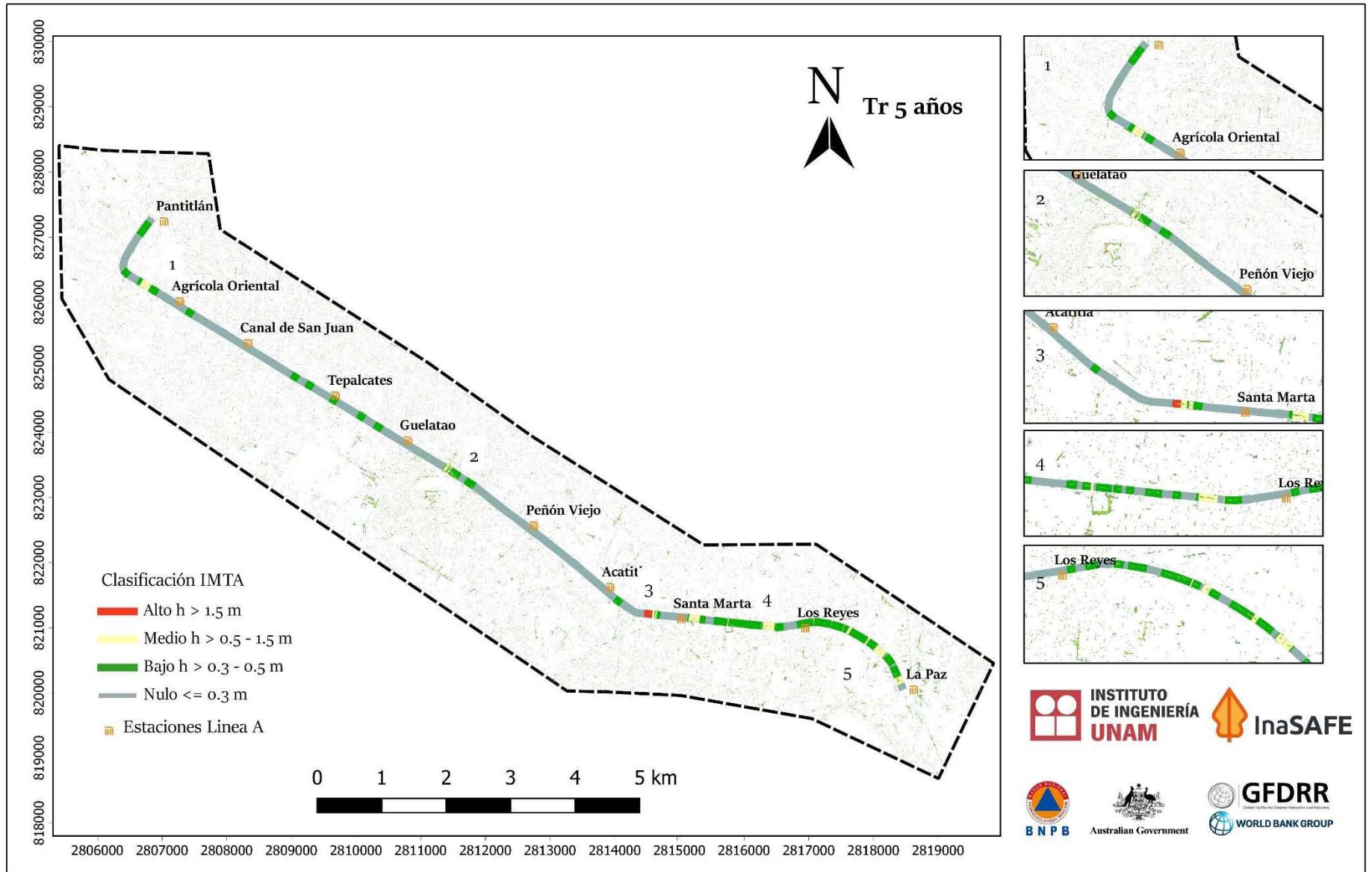


Figura 5.2.2 Vulnerabilidad en la zona para Tr 5 años

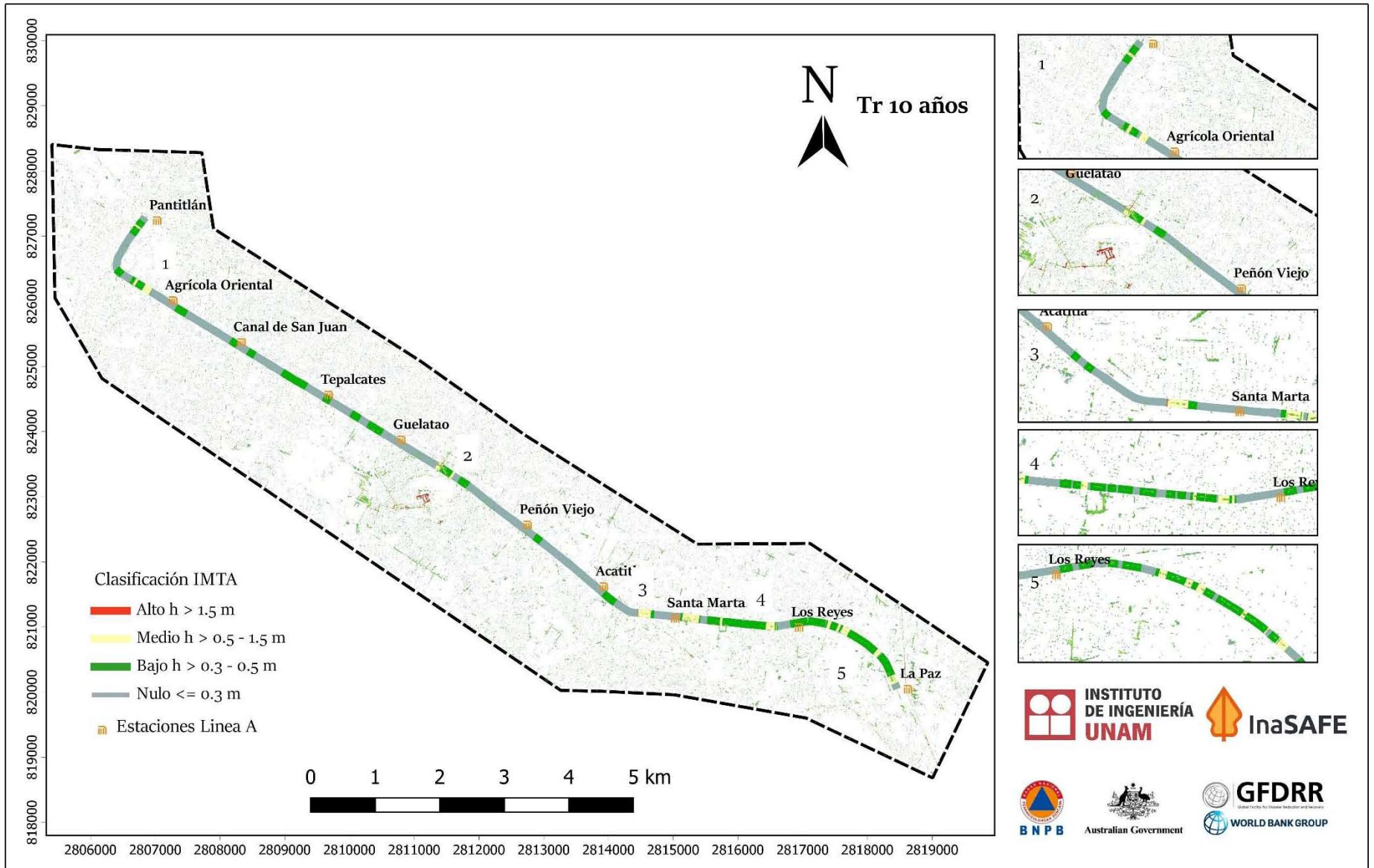


Figura 5.2.3 Vulnerabilidad en la zona para Tr 10 años

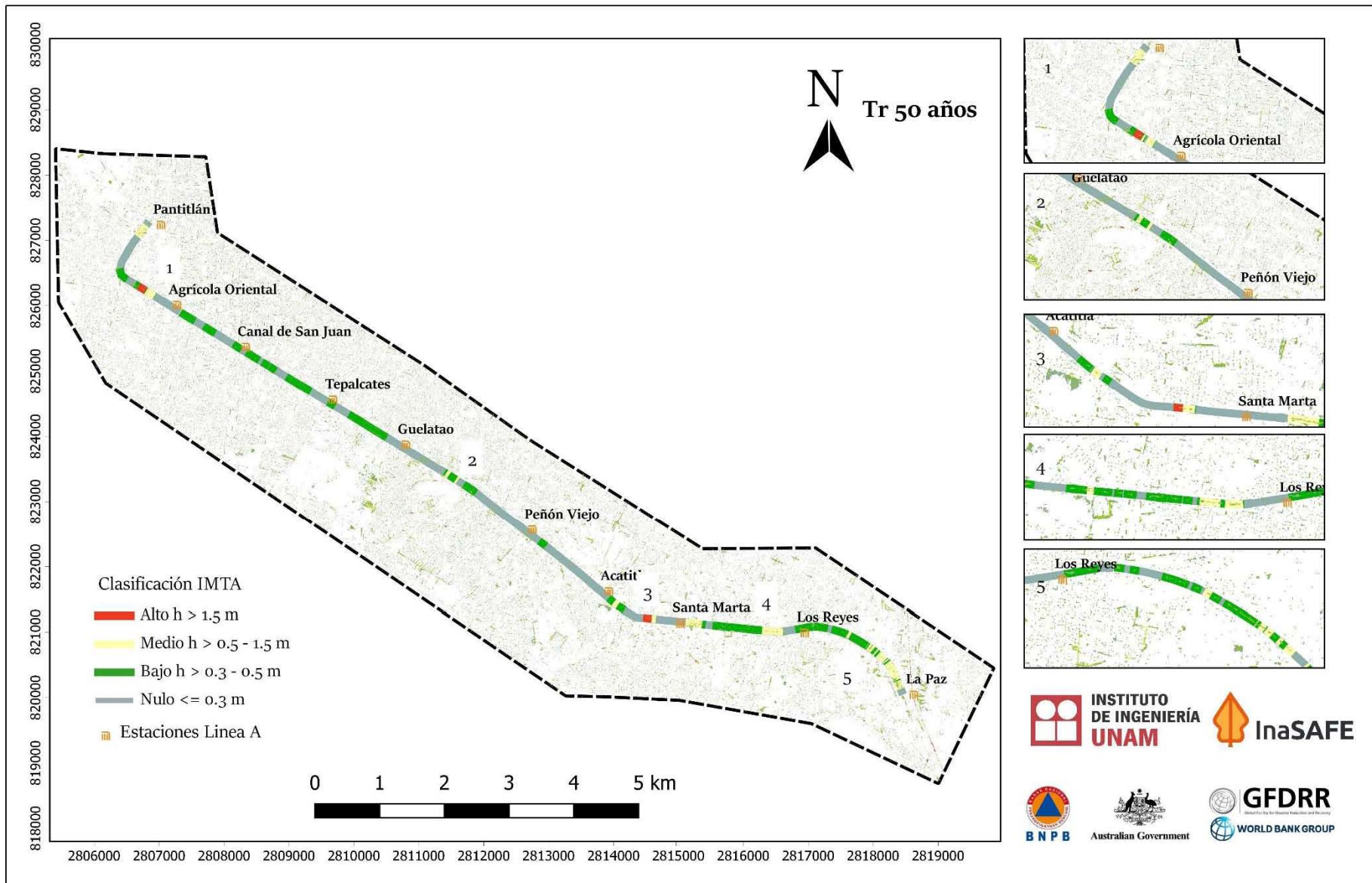


Figura 5.2.4 Vulnerabilidad en la zona para Tr 50 años

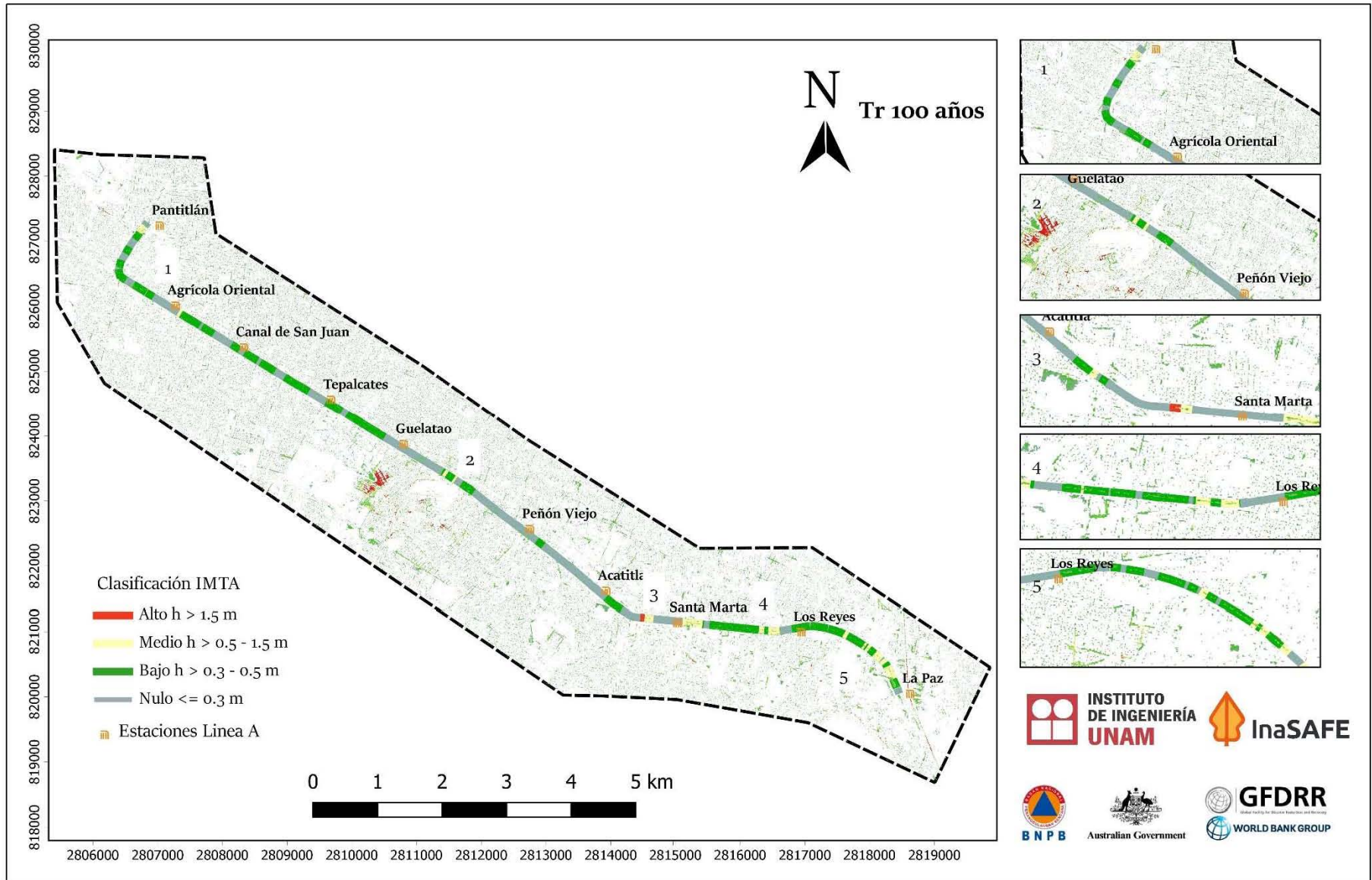


Figura 5.2.5 Vulnerabilidad en la zona para Tr 100 años

5.3 Propuesta de mitigación

La CONAGUA sugiere que, para aeropuertos, estaciones de ferrocarril y autobuses el periodo de retorno de diseño de drenaje pluvial sea de 10 años, para protección de infraestructura de 50 años en vías de acceso y 200 años en infraestructura de servicios públicos (MAPAS, 2015).

Por su parte el Cuaderno de Investigación en Obras de Protección contra Inundaciones (CENAPRED, 2014) explica que para la determinación de riesgo y el diseño de una obra de protección en base a un periodo de retorno es una práctica tradicional que, en ocasiones, no involucra aspectos como la cuantificación monetaria de los daños. En cambio, analizar la relación entre la elevación de la superficie libre del agua y los daños esperados, aprovecha factores como avenidas históricas en el área de estudio, la estimación del costo de los daños y la relación entre la profundidad de la inundación y el porcentaje de daños. Bajo el esquema de simulación relacionando inundación-periodo de retorno, explica la probabilidad de ocurrencia, evaluación de impacto y apoyo de las distintas obras estructurales y no estructurales además de tomar en cuenta las posibles incertidumbres en los datos básicos.

De lo anterior se expone una sugerencia de medidas estructurales y el periodo de diseño para avenidas según la importancia y posibles daños:

Tabla 5.8 Periodos de retorno para avenidas de diseño en diferentes obras de protección

Fuente: Adaptación (Maza, 1997)

Tipo de obra	Tr (años)
Bordos perimetrales para instalaciones industriales	50 - 100
Bordos perimetrales para proteger poblados	500 - 1000
Bordos y muros longitudinales para proteger:	50 - 200
a) Zonas industriales y urbanas	100 - 500
b) Zonas densamente pobladas	500 - 1000
c) Ciudades	1000
Desvíos, asociados a bordos longitudinales	25 - 1000
Puentes carreteros en carreteras con tráfico constante	50 - 200
Puentes carreteros con tráfico intenso	200 - 1000
Puentes de ferrocarril principales y secundarias	50 - 1000

Durante la revisión del caso de estudio se realizó una visita de campo al lugar, para conocer con mayor profundidad el problema. Se encontró que en las intersecciones desde la estación La Paz a Santa Marta, el muro de contención está compuesto por un monolito de hormigón de 90 cm de altura y 20 cm de banqueta. El resto del confinamiento comprende una malla ciclónica que permite el paso del agua, una vez rebase su altura. Las zonas con mayor propensión de inundación son los pasos a desnivel, por lo que una vez rebasada la altura del muro, el ingreso del agua es inminente. En otros casos, existen orificios entre tramos de muro, lo cual es factor para que la vía de rodamiento se inunde (Figura 5.3.4).

Con base en la información mostrada, se realizará una propuesta para un periodo de retorno de 50 años, tomando en cuenta los enfoques descritos.

De los mapas de vulnerabilidad se han analizado propuestas de intervención de la infraestructura del metro y otras administrativas, enumeradas de la siguiente manera:

1. Aumentar la altura del muro de contención de 90 cm a 1.3 m en la interestación Los Reyes a Santa Marta, de acuerdo a los tirantes mostrados en la Tabla 5.3.
2. En la interestación Santa Marta- Acatitla, se propone aumentar el tirante hasta 1.8 m, es decir 70 cm más de muro, puesto que es la zona con mayor recurrencia de inserción de agua (Figura 5.3.2).
3. En la estación Acatitla, se propone instalar placas contra inundaciones en la zona de acceso a la estación, que deberán medir hasta 1.2 m de altura (Figura 5.3.3). Se analizó que el área requiere una rehabilitación del drenaje y la placa propuesta sólo disminuirá la vulnerabilidad de los pasajeros.
4. En la estación Pantitlán se recomienda cubrir el perímetro de la estación de acceso, con barras de hasta 1.5 m de altura, que reducirá la inundación por el desnivel existente en el patio de acceso de 50 cm (Figura 5.3.5).
5. Aun cuando las medidas de mitigación sean eficientes, la vulnerabilidad es constante debido a las condiciones del suelo y la variabilidad climática. Por esta razón se propone que aunado al reporte de avance de los trenes por parte del S.T.C Metro (Figura 5.3.1), se añada una alerta temprana de inundación dependiendo de la Línea o estación, vinculado con las mediciones en tiempo real del Observatorio Hidrológico y la escala de precipitación de SACMEX (Tabla 4.2). Con ello se informará a la población en caso de algún siniestro, la puesta en marcha de transporte alternativo y evitar la zona.

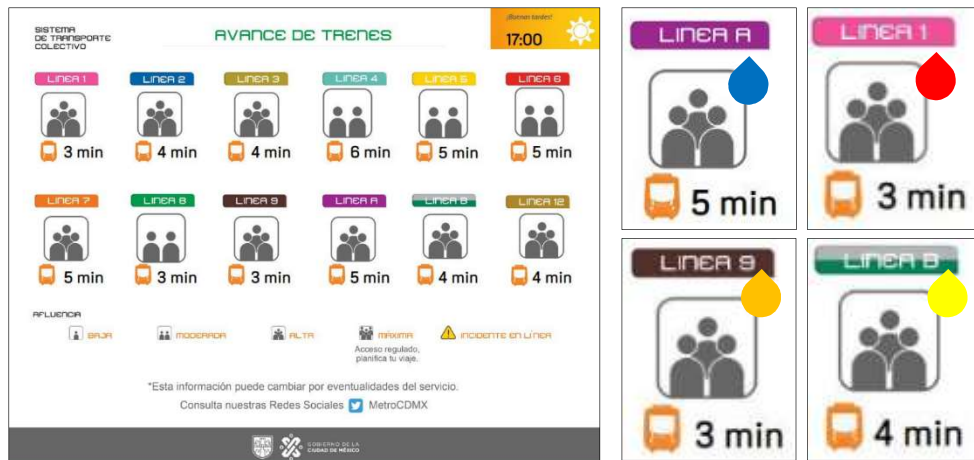


Figura 5.3.1 Propuesta de alerta de lluvia e inundación
Fuente: Propia con uso de pictogramas de S.T.C. Metro

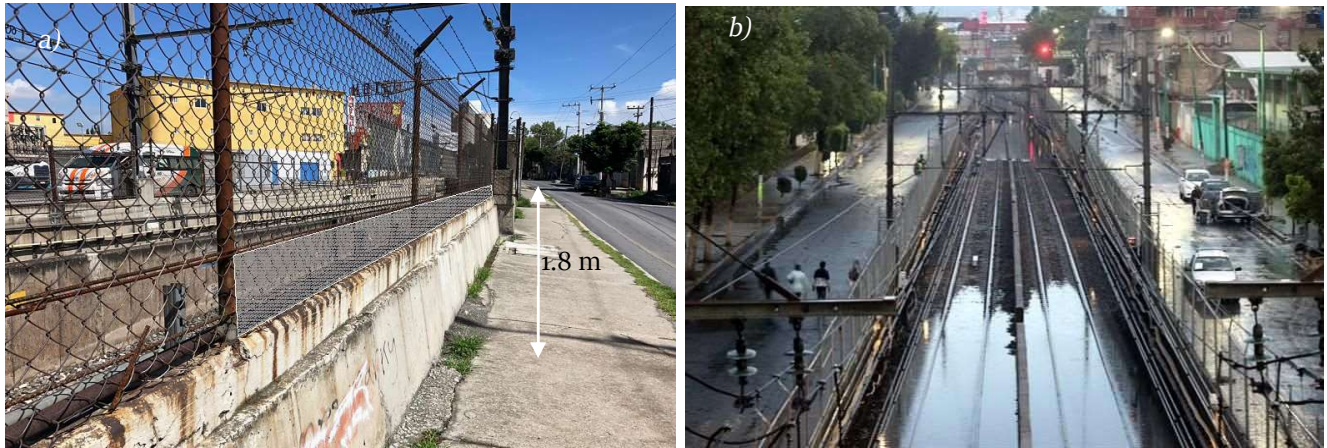


Figura 5.3.2 a) Propuesta Interestación Los Reyes – Santa Marta b) Falla



Figura 5.3.3 a) Propuesta en acceso a la estación Acatitla b) Falla



Figura 5.3.4 a) Propuesta de cubierta de orificios b) Falla



Figura 5.3.5 a) Propuesta en la estación Pantitlán b) Estado normal en el interior c) Falla

Figura N. Problemática en acceso a la estación Pantitlán

Fuente: Televisa, 2018

Capítulo 6



*Los Reyes (Acaquilpan)
“a la orilla del agua”*

Conclusiones

El presente trabajo demuestra que la metodología planteada permitió revisar la vulnerabilidad de una red de transporte como el Metro de la Ciudad de México; cuyas características y entorno, enriquecen y ejemplifican las repercusiones de eventos hidrometeorológicos extremos en zonas urbanas.

En el capítulo de estado del arte, se explicó que la incorporación de distintos enfoques de análisis, integra y determina con mayor certidumbre la reproducción de eventos; reconociendo con facilidad daños, omisiones y fallas de la infraestructura. La revisión de estudios previos, permitió conocer alternativas de mitigación, condiciones de frontera y oportunidades de análisis; como el caso presentado, donde interviene únicamente la precipitación. Esto significa que su estudio contribuirá a futuras revisiones en sistemas de transporte en auge, como son los autobuses biarticulados, u otros sistemas de ferrocarriles metropolitanos bajo condiciones similares.

Por su parte, el análisis de vulnerabilidad aplicando una clasificación regional, permitió contextualizar y caracterizar el estudio, evitando que las propuestas de solución rompieran con las características de la infraestructura existente.

Gran parte del estudio y el éxito del mismo reside en la calidad de la información, los parámetros y forzamientos de ingreso. El uso de las herramientas de percepción remota e información geográfica; demostraron ser una herramienta útil y necesaria en el estudio de inundaciones urbanas. Así, el Modelo Digital de Elevación determinó que la simulación de los tirantes fueran congruentes, disminuyendo errores volumétricos o fuera de la realidad.

Fue primordial contar con la información libre de uso y tipo de suelo, puesto que, para reducir la incertidumbre del modelo, contar con dichos datos mejoró la calidad de los resultados obtenidos.

En referencia a Itzi e InaSAFE, los softwares libres generan mayores beneficios académicos y científicos, pues el acceso ilimitado y fácil manejo, incrementan la posibilidad de solución a problemas con impacto social. Adicionalmente, los registros de lluvia en tiempo real traen oportunidades de estudio, debido a que la información limitada de las estaciones climatológicas, obstaculiza la acción-respuesta que requiere una inundación. Por su parte, con la ayuda de los mapas de lluvia del CENAPRED, el análisis se ejecutó con celeridad y fungiendo como marco de referencia.

La valoración de la inundación en la vía de rodamiento de la Línea A del metro, implica que el Sistema de Transporte Colectivo Metro conozca qué estaciones e interestaciones requieren de atención. Esto significa que a pesar de que las obras propuestas se ejecuten, existirán lluvias con periodos de retorno mayores. En estos casos, los mapas de vulnerabilidad ayudarán a establecer

planes de acción inmediatos, en tanto se estime el periodo de retorno de la lluvia pronosticada. Con la ubicación de las estaciones más vulnerables, el Gobierno de la Ciudad de México y el Estado de México, puede destinar recursos para las zonas constantemente afectadas o en caso extremo, gestionar la solicitud de apoyos al FONDEN⁹.

Por el análisis realizado, se demuestra la alta incidencia de encharcamientos en la Calzada Ignacio Zaragoza interfiriendo en la vulnerabilidad de la Línea. Con las simulaciones descritas se ejemplifica que, ante cualquier lluvia presentada, la red del metro es vulnerable; debido a su confinamiento. Sin embargo, factores como el hundimiento en la zona, exige la revisión constante de la infraestructura y su adecuación. Desafortunadamente, en este trabajo no se contempla la red de drenaje, puesto que el objetivo de esta tesis es la búsqueda de las condiciones de frontera para las lluvias de diseño presentadas, además del limitado acceso a dicha información.

La lluvia del 14 de junio de 2018, es una lluvia clasificada con un periodo de retorno de 2 años. Esto se demuestra con las métricas realizadas. Así mismo, puede entenderse que tal evento no es único, porque el historial de encharcamientos de la zona expone eventos similares con frecuencia, al menos dos veces por año.

Debido al número de habitantes de la ZMVM y la importancia del Metro de la Ciudad de México, será fundamental que existan mapas de vulnerabilidad en las once líneas restantes. Esto significará el ahorro de presupuesto destinado al transporte alternativo que opera durante la imposibilidad de circulación de los trenes, pérdidas por remediación de infraestructura, pérdida de vidas y daños a usuarios.

En futuras investigaciones es viable analizar la vulnerabilidad para la red del Metrobús, ciclistas y toda infraestructura vial que pueda ser susceptible a inundaciones. La simulación puede realizarse con Itzi, al demostrarse que es una herramienta confiable y generar los mapas de vulnerabilidad con InaSAFE.

⁹ Fideicomiso Fondo Nacional de Desastres correspondiente a la Secretaría de Gobernación

Referencias

1. Abbot, M., Refsgaard, J. (1996) "Distributed Hydrological Modelling" Water Science and Technology Library V. 22. ISBN-13: 978-94-010-6599-3.
2. Alcocer-Yamanaka, V. (2016) "Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas". *Tecnol. Cienc. Agua* 2016. Vol. 7, n. 5, pp. 33-55. ISSN 2007-2422.
3. Almejo, R., Téllez, Y. (2015) "Cambio demográfico en la Zona Metropolitana del Valle de México, 2000-2010". *Revista CONAPO La situación demográfica de México*.
4. Aoki, Y., Yoshizawa, A., Tomoya, T. (2016) "Anti-inundation measures for underground stations of Tokyo Metro". 15th International scientific conference "Underground urbanisation as a prerequisite for sustainable development. Elsevier 1877-7058. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.730
5. Arganis, M., Domínguez, R., et al. (2010) "Eventos Extremos." en Jiménez, B., Torregosa, M., et al., *El agua en México: cauces y encauces*. Academia Mexicana de Ciencias, Comisión Nacional del Agua. Primera edición. Pp. 563 – 594.
6. Auvinet, G., et al. (2017) "El subsuelo de la Ciudad de México" Vol. I y III Instituto de Ingeniería, UNAM. ISBN 978-607-02-8195-2.
7. Bobylev, N. (2009) "Mainstreaming sustainable development into a city's Master plan: A case of urban underground space use". *Land Use Policy* 26(4):1128-1137. DOI: 10.1016/j.landusepol.2009.02.003.
8. Büchele, B., Kreubich, H., et al. (2006) "Flood-risk mapping: contributions towards and enhanced assessment of extreme events and associated risks". *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 6, 485-503, 2006. Doi: 10.5194/nhess-6-485-2006.
9. Cardona, D., et al. (2011) "Metodología de Modelación Probabilista de Riesgo Naturales". *Informes Técnicos ERN América Latina /CAPRA Tomos 1,2,3,4*.
10. Collaboration for Australian Weather and Climate Research (2015) "Forecast Verification Methods Website". URL <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification>.
11. CONAGUA (2014) "Lineamientos para la elaboración de mapas de peligro por inundación" Subdirección General Técnica/Gerencia de aguas superficiales e ingeniería de ríos. México
12. CONAGUA (2015) "Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Drenaje Pluvial Urbano" Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. pp. 275- 279
13. Courty, L., Pedrozo-Acuña, A., Bates, P. (2017) "Itzi (version 17.1): an open-source, distributed GIS model for dynamic flood simulation". *CEGU. Geosci. Model Dev.*, 10, 1835-1847, 2017. doi:10.5194/gmd-10-1835-2017.
14. Courty, L.G., Soriano-Monzalvo, J.C., y Pedrozo-Acuña, A. (2017) "Evaluation of open-access global digital elevation models (AW3D30, SRTM and ASTER) for flood modelling purposes". DOI: 10.5281/zenodo.885571.

15. Chen, Y., Yeh, C., Yu, B. (2011) "Integrated application of the analytic hierarchy process and the geographic information system for flood risk assessment and flood plain management in Taiwan". *Nat. Hazards* 59, 1261–1276.
16. Chen J., Ban Y., Li S. (2014) China: Open access to Earth land-cover map. *Nature*, 2014, 514(7523): 434-434. DOI:10.1038/514434c.
17. Darabi, H., Choubin, B., et al. (2018) "Urban flood risk mapping using GARP and Quest models: A comparative study of machine learning techniques". *Journal of Hydrology* 23308 doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.12.002.
18. Danhelka, J., Vlasák T. (2012) Evaluation of Real-time Flood Forecasts in the Czech Republic 2002-2012. Guide of the Flood Forecasting Service in the Czech Republic. URL: http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/pruvodce/vyhodnoceni_en.html.
19. Domínguez, M. R., Carrizosa, E. E., Fuentes, M. G. E., Galván, T. A. E., Salas, S. M. A., Robles, M. T. P., Baeza, R. C., & González, O. S. (2012). "Mapas de Precipitaciones para Diferentes Periodos de Retorno y Duraciones". *Memorias del XXII Congreso Nacional De Hidráulica Acapulco, Guerrero, México*.
20. Domínguez, R. Carrizosa, E. Fuentes, G., Arganis, M., et al. (2018) "Análisis regional para estimar precipitaciones de diseño en la República Mexicana" *Memorias del Congreso Nacional de Hidráulica*.
21. Duy, P., Chapman, L., Tight, M. (2019) "Resilient transport systems to reduce urban vulnerability to floods in emerging-coastal cities: A case study of Ho Chi Minh City, Vietnam" *Hong Kong Society for Transportation Studies*. Elsevier doi: 10.1016/j.tbs.2018.11.001
22. Eakin, H., Lerner, A., et al. (2016) "Adapting to risk and perpetuating poverty: Household's strategies for managing flood risk and water scarcity in Mexico City". *Environ. Sci. Policy* 1462-9011. Doi: 10.1016/j.envsci.2016.06.006.
23. Ecksterin, D., Hutfil, M., et al. (2018) "Global Climate risk index 2019. Who suffers most from extreme weather events?". *Germanwatch e.V.* ISBN 978-3-943704-70-9.
24. Foulds, S. Macklin, M. (2016) "A hydrogeomorphic assessment of twenty-first century floods in the U.K.". *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 256-270 Wiley Online Library DOI: 10.1002/esp.3853.
25. Fuentes, Óscar. (2011) "Estimación del peligro y vulnerabilidad por inundaciones en zonas urbanas" *Presentación en la Semana de Riesgos naturales y Antropogénicos el día 28 de noviembre de 2011. Instituto de Ingeniería UNAM*.
26. Gallina, V., et al. (2016) "A review of multi-risk methodologies for natural hazards: Consequences and challenges for a climate change impact assessment". *Journal of environmental Management* Vol. 168 (2016) pp. 123-132. Doi: 10.1016/j.jenvman.2015.11.011.
27. Gobierno de la Ciudad de México (2019) "Plan estratégico de movilidad de la Ciudad de México 2019. Una ciudad, un sistema". *Infografía*.

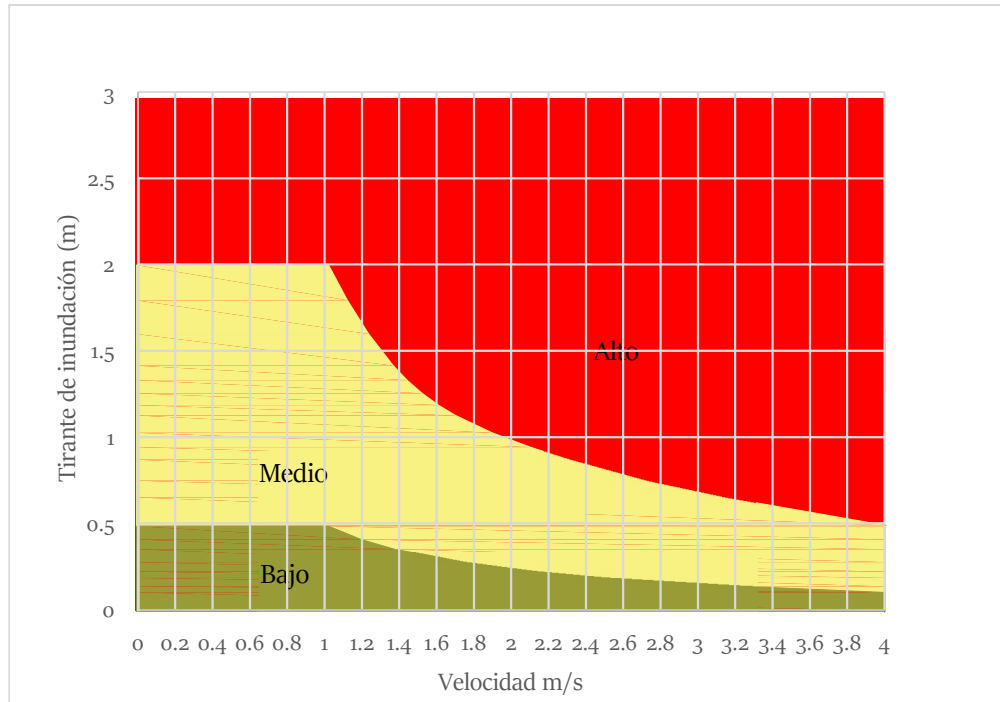
28. Gobierno de la Ciudad de México/ S.C.T. Metro (2018) "Plan maestro del metro 2018-2030".
29. Gobierno del Distrito Federal (2018) "Impactos y costos económicos del cambio climático" Ciudad de México.
30. Gobierno del Estado de México (2017) "Obra Pública. Resumen de las principales obras terminadas y en proceso de la Secretaría de Obra Pública 2017".
31. González, F., Carrillo, Juan. (2014) "Estudio para el proyecto hidrológico para proteger a la población de inundaciones y aprovechar mejor el agua. Informe Final Instituto de Ingeniería-CONAGUA.
32. Guzmán, A., Lozano, A., Miranda, M. (2018) "Herramienta para búsqueda de propósito de viaje, sexo del viajero y origen y destino del viaje". Instituto de Ingeniería, UNAM.
33. Hashimoto, H., Park, K. (2008) "Two-dimensional urban flood simulation: Fukuoka flood disaster in 1999". WIT Transaction on ecology and the environment Vol. 118 ISSN 1743-3541 (on-line) doi:10.2495/FRIARo80061.
34. Herath, S., Dutta, D. (2004) "An urban flood risk analysis system and its application" K. Meguro, Assessment of Post-event Management Processes using Multi-media disaster simulation (1 ed., pp. 11 - 20). Japan: US-Japan Cooperative Research on Urban Earthquake Disaster Mitigation.
35. Hirabayashi, Y., Mahendran, R., et al. (2013) "Global flood risk under climate change". Nature Climate Change 3.9, pp. 816-821. ISSN: 1758-678X. DOI: 10.1038/nclimate1911.
36. Hulme, K., Hou, Y., et al. (2014) "An integrated traffic-driving simulation framework: Design, implementation, and validation". Transportation Research Part C 45 (2014) 138-153. DOI: 10.1016/J.TRC.2014.02.004.
37. IMTA (2012) "Programa Nacional contra contingencias Hidráulicas (PRONACCH). Región Hidrológico-Administrativa XIII Aguas del Valle de México. Tomo I, II, III y IV.
38. Instituto de Investigaciones parlamentarias. (2012) "Diagnóstico de movilidad en la Ciudad de México: El impacto del crecimiento vehicular (problemas, estadísticas y evaluación de políticas)". Asamblea Legislativa del Distrito Federal VII Legislatura.
39. Jha, A., Bloch R., Lamond, J. (2011) "Ciudades e Inundaciones. Guía para la Gestión Integrada del Riesgo de Inundaciones en Ciudades en el Siglo 21". NDMI/GFDRR/ WORLD BANK Washington ISBN 978-0-8213-8866-2.
40. Jiménez, B., Mazari, M., Domínguez, R., Cifuentes, E. (2004) "El agua en el Valle de México". Revista de Psicodidáctica 1(1):26-33
41. Jkoubek, M. (2007) "Flood protection of Prague metro after the 2002 flood". Urban Space-4th Dimension of Metropolises- Bartak Hrdina, Romancov & Zlámal. ISBN 978-0-415-40807-3.
42. Kaufman, S. Qing, C., Levenson, N., Hanson, M. (2012) "Transportation during and after Hurricane Sandy". NYU Wagner Graduate School of Public Service.
43. López, Marco. (2017) "Enfoque integrado para la revisión y adaptación del drenaje carretero al cambio climático". Instituto de Ingeniería, UNAM.

44. Lyu, H., Shen, S., Yang, J., Yin, Z. (2019) "Scenario-based inundation analysis of metro systems: a case study in Shanghai". CEGU. Hydrol. Earth Syst. Discuss. Doi: 10.5194/hess-2019-28.
45. Lyu, H., Shen, S., Zhou, A., Yang, J. (2019) "Perspectives for flood risk assessment and management for mega-city metro system". Tunnelling and Undergorund Space Technology 84 (2019) 31-44 doi: 10.1016/j.tust.2018.10.019.
46. Lyu, H., Sun, W., Shen, A., Arulrajah, A. (2018) "Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach". Science of the Total Environment 626 (2018) 1012-1025 doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.138.
47. Lyu, H., Wang, G., Shen, J., Lu, L., Wang, G. (2016) "Analysis and GIS mapping of flood hazard on 10 May 2016, Guangzhou, China". Water Journal. (2016) 8, 477. doi:10.3390/w8100447.
48. Lyu, H., Wu, Y. et al. (2018) "Assessment of social-economic risk of Chinese dual land use systems using fussy AHP". Journal Sustainability 2018, 10, 2451. doi:10.3390/su10072451.
49. Mattsson, L., Jenelius, E. (2015) "Vulnerability and resilience of transport systems- A discussion of recent research" Transportation research Part A Elsevier doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.138.
50. Murnane, R. (2015) "QGIS, InaSafe and Open Street Map for Impact Forecasting". WMO/ GFDRR NaTCatRisk Presentation.
51. Nott, J. (2006) "Extreme events: a physical reconstruction and risk assessment" Cambridge University Press, Cambridge U.K. pp1-310. ISBN 978-0-521-82412-5.
52. OCDE (2015) "Estudios Territoriales de la OCDE, Valle de México. Síntesis del Estudio". Doi: 10.1787/9789264245174-en.
53. Ouma, Y., Tateishi, R. (2014) "Urban flood vulnerability and risk mapping using integrated multi-parametric AHP and GIS: methodological overview and case study assessment". Water Journal, 6, 1515-1545. doi:10.3390/w6061515.
54. PAOT (2015) "Estudio para la elaboración de una metodología de evaluación del impacto en movilidad de obras, proyectos y modificación de usos de suelo" Entrega Fase 4. Ciudad de México.
55. Pasi, R., Consonni, C., Napolitano, M. (2015) "Open community Data & official public data in flood risk management: a comparison based on Ina SAFE". Geomatics Workbooks 12- "FOSS4G Europe Como 2015".
56. Peck, R. (1969) "Main Session 4: Deep excavations and tunneling in soft ground". International Congress of Soil Mechanics México City (1969) pp. 225; 311- 375.
57. Pedrozo-Acuña, A., Breña, A., Domínguez, R. (2014) "The hydrological setting of the 2013 floods in Mexico" Water Journal 69.11, pp. 295-302. ISSN: 00431656. DOI:10.1002/wea.2355.
58. Pedrozo-Acuña, A., Laverde-Barajas, M. A., González-Armenta, J. G., Medellín-Mayoral, G., y Rodríguez-Rincón, J.P. (2010) "Modelación de procesos costeros en la descarga del río

- Tonalá al Golfo de México”. Plan Hídrico Integral de Tabasco (PHIT) Tercera etapa. Cap. 9.
59. Pornasodoro, K., Silva, L., et al. (2014) “Flood risk of metro Manila Brangays: A Gis based risk assessment using multi-criteria Techniques”. *Journal in Urban and Regional Planning* 2014 ISSUE.
 60. Quan, R. Zhang, L., Lyu, H., Wang, J.m Niu, H. (2011) “Risk assessment of rainstorm waterlogging on subway in Central Urban Area of Shanghai, China Based on scenario simulation”. *IEEE National Natural Science Foundation of China* 978-1-61284-848-8/11.
 61. Rawls, W., Asce, M., Brakensiek, L, Miller, N. (1983) “Green- Ampt infiltration parameters from soils data”. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, 17613. Downloaded 22 Oct 2010 to 139.78.40.222. Redistribution subject to ASCE license or copyright. Visit.
 62. Rodríguez, H. (2013) *Inundaciones en zonas urbanas. Medidas preventivas y correctivas, acciones estructurales y no estructurales*. UNAM
 63. Romero, P. (2010) “Water in Mexico City. What will climate change bring to its history of water- related hazards and vulnerabilities?” *Environment and Urbanization*. International Institute for Environment and Development (IIED) Vol. 22(1): 157-178. DOI: 10.1177/0956247809362636.
 64. Rosenzweig, A., et al. (2018) “Climate Change and Cities. Second Assessment report of the urban Climate Change research network. Summary for city leaders”. Cambridge Core doi: 10.1017/9781316563878.007.
 65. SACMEX (2018) “Diagnóstico, Logros y desafíos” D.R. Sistema de Aguas de la Ciudad de México. Helios Comunicación.
 66. Salas, M., Jiménez, M. (2007) “Inundaciones” Serie Fascículos CENAPRED México ISBN: 970-628-870-8.
 67. Salas, M. (2014) “Obras de protección contra inundaciones” Cuaderno de Investigación 49 CENAPRED, México 1999. Versión electrónica 2014.
 68. Sander, E. (2007) “Storm Report, 2007” MTA.
 69. Sayers, Paul (2012). “Flood Risk. Planning, design and management of flood defence infraestructura”. ICE Publishing. London, UK. ISBN: 9780727741561.
 70. Schreider S., Smith, D., Jakeman, A. (2000) “Climate Change impacts on urban flooding”. 91-115, 2000.
 71. Shen, S.L., Xu, Y.S. (2011) “Numerical evaluation of land subsidence induced by groundwater pumping in Shanghai”. *Can. Geotech. J.* 48 (9), 1378-1392.
 72. Shen, S.L., Wu, H.N., Cui, Y.J., Yin, Z.Y. (2014) “Long-term settlement behavior of the metro tunnel in Shanghai”. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 40, 309-323.
 73. Shen, S.L., Cui, Q.L., Ho, E.C., Xu, Y.S. (2016) “Ground response to multiple parallel microtunneling operations in cemented silty clay and sand”. *J. Geotech. Geoenviron.* 142 (5):1-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001441](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001441) (04016001).

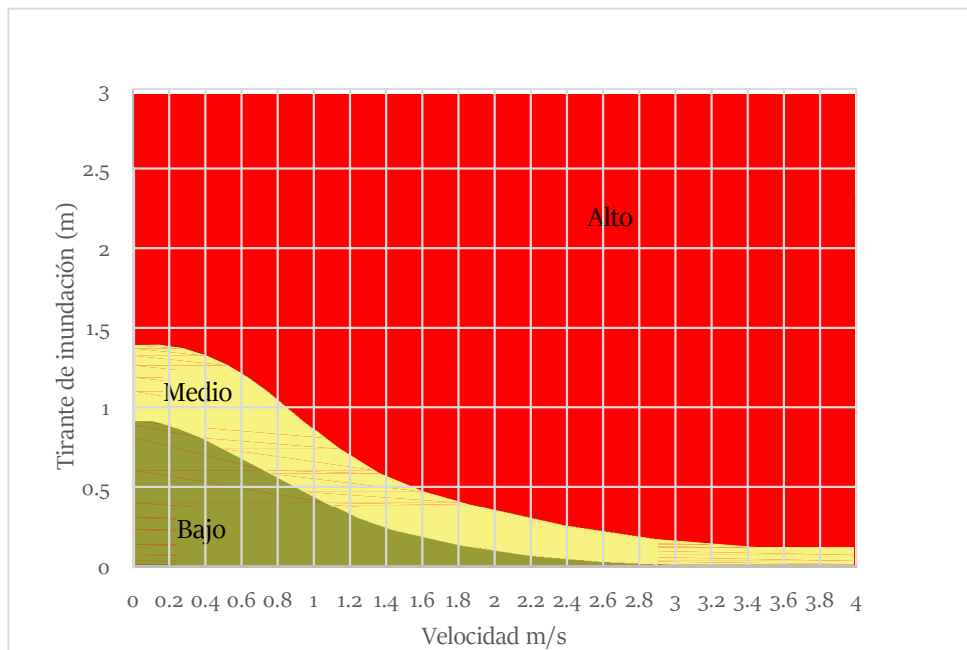
74. State of New South Wales (2005) "Floodplain Development Manual. The management of flood liable land". Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources, Sydney Australia. ISBN: 0-7347-5476-0.
75. S.T.C. Metro/ Gerencia de Instalaciones Fijas (2013) "Operación de cárcamos y equipos hidroneumáticos que se tienen en distintas líneas del metro de la S.T.C.". Gobierno del Distrito Federal.
76. Stevens Institute of Tecnhology (2013) "Sandy and its impacts" Ch. 1 pp 11-18.
77. Suarez, P., Anderson, W., Mahal, V., Lakshmanan, T. (2005) "Impacts of flooding and climate change on urban transportation: A systemwide performance assessment of the Boston Metro Area". Transportation Research Part D. 10 (2005) 231-244. doi:10.1016/j.trd.2005.04.007.
78. United Nations Population Fund (2019) "Annual report 2018". E/1500/2019. ISBN: 978-0-89714-043-0.
79. Vis, M., Knight, R., Pool, S., Wolfe, W. Seibert, J. (2015) "Model Calibration criteria for estimating ecological flow characteristics". Water Journal (2015) 7, 2358-2381. doi:10.3390/w7052358.
80. Wang, J. Y. T. (2015) "Resilience thinking in transport planning" Civil Engineering and Environmental Systems. Doi: 10.1080/10286608.2015.1014810.
81. Wang, X. J., Zhao, R., Hao, Y. (2011) "Flood control operations based on the theory of variable fussy sets". Water Resource Manage (2011) 25:777-792 School of Civil & Hydraulics Engineering, China. DOI 10.1007/s11269-010-9726-5.
82. Willems, P., Olsson, K., Nguyen, V.T.V., et al. (2012) "Impacts of Climate Change on Rainfall Extremes and Urban Drainage Systems". IWA Publishing ISBN 9781780401256 (Paperback).
83. WMO (2008) "Urban flood risk management. A tool for integrated flood management". APFM 11 Flood Management Tools Series.
84. World Bank (2011) "Five feet high and rising. Cities and flooding in the 21st century". Policy Research working paper 5648.

Anexo



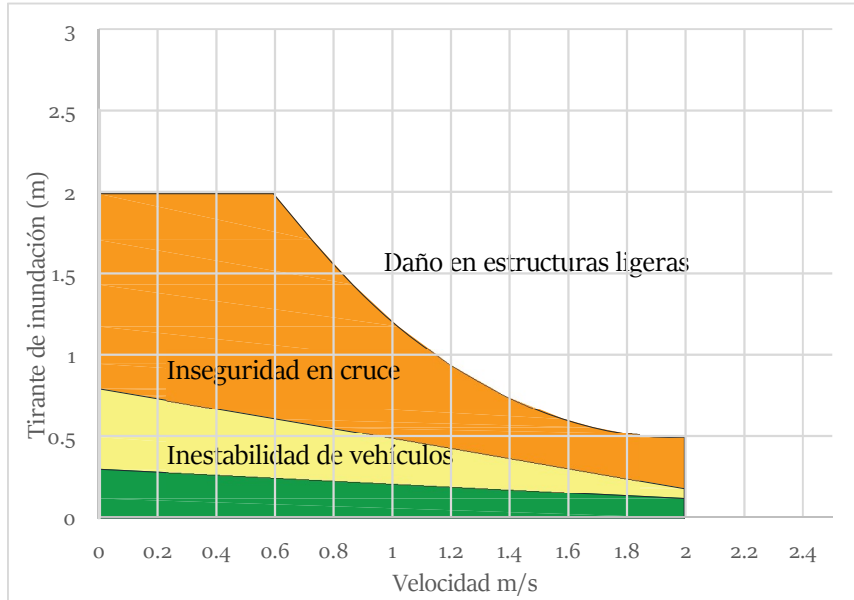
A.1 Nomograma de riesgo de inundación criterio OFEE

Fuente: Adaptación de Alcocer-Yamanaka et. al. (2016)

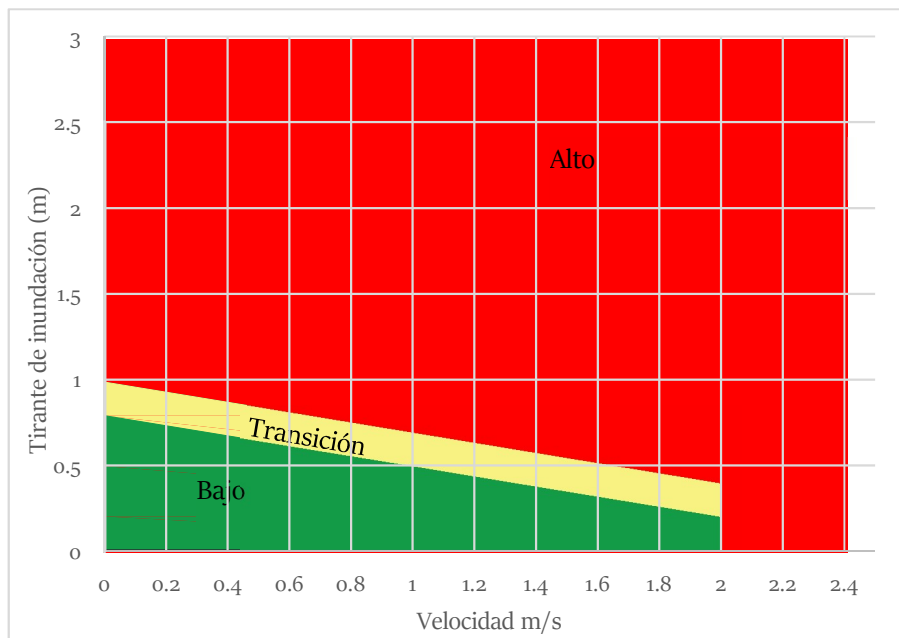


A.2 Nomograma de riesgo de inundación criterio FEMA

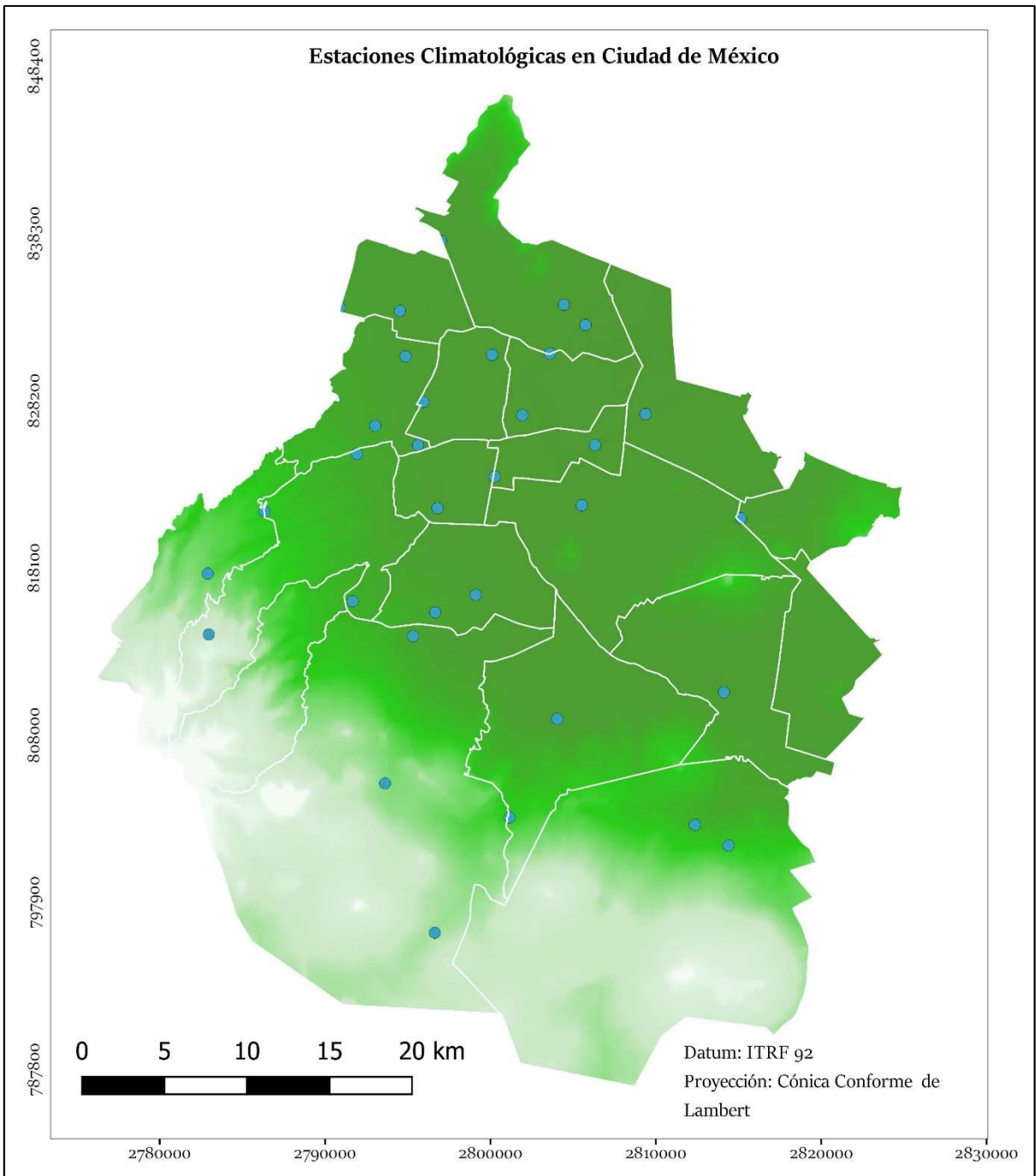
Fuente: Adaptación de Alcocer-Yamanaka et. al. (2016)



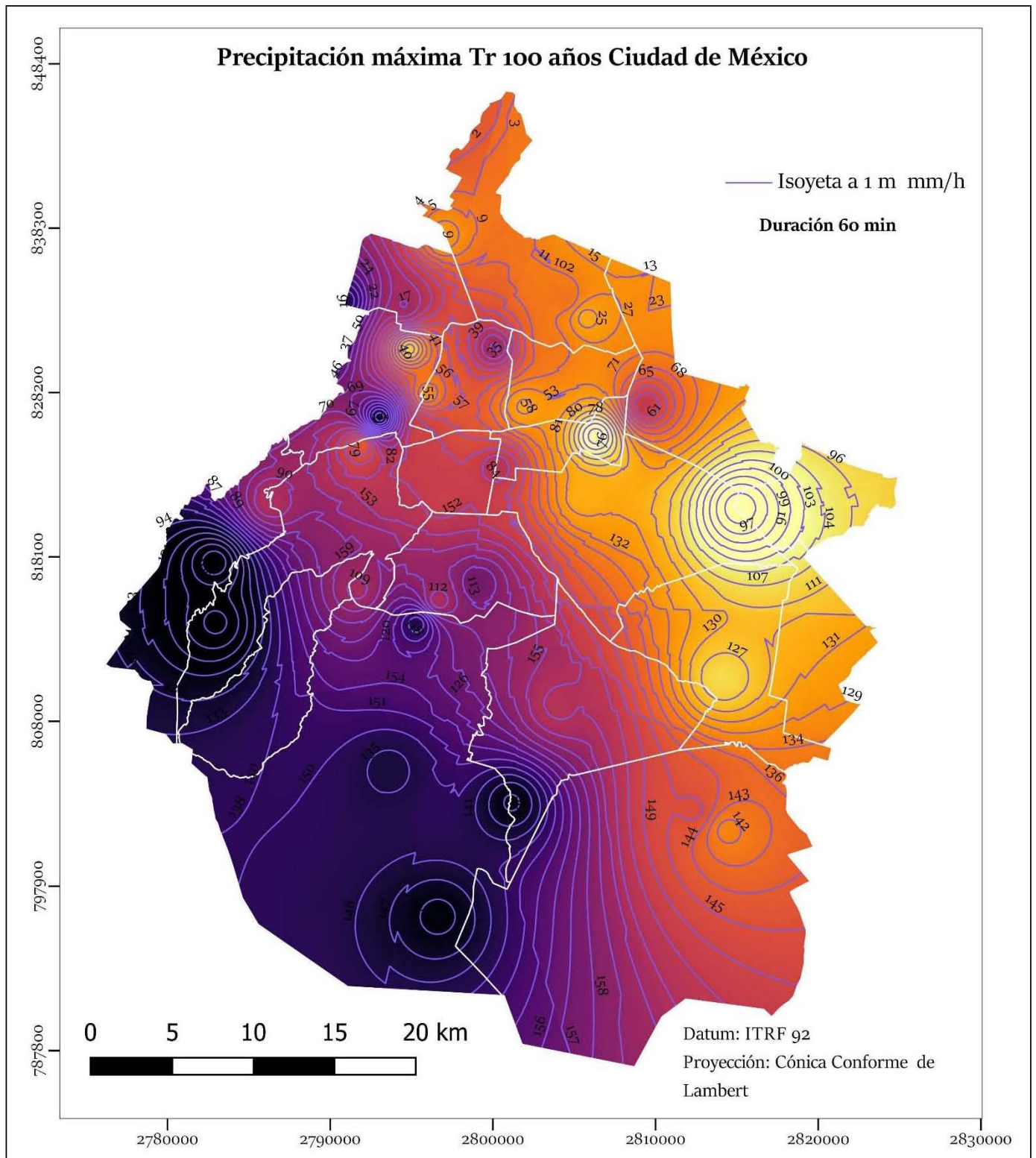
A.3 Nomograma de estudio de riesgo de inundación criterio NSW
 Fuente: Adaptación de NSW. (2005)



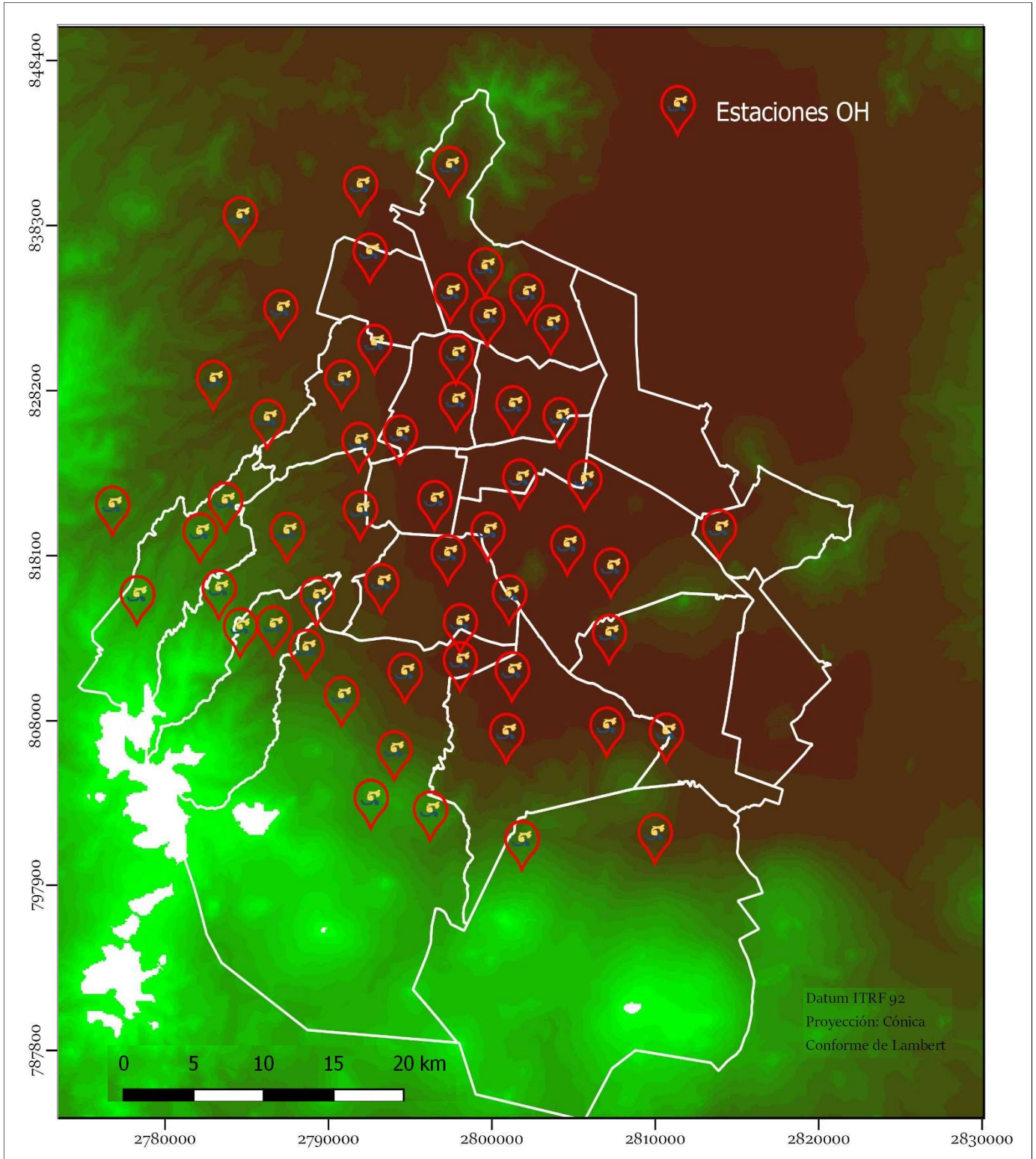
A.4 Nomograma práctico de riesgo de inundación criterio NSW
 Fuente: Adaptación de Adaptación de NSW. (2005)



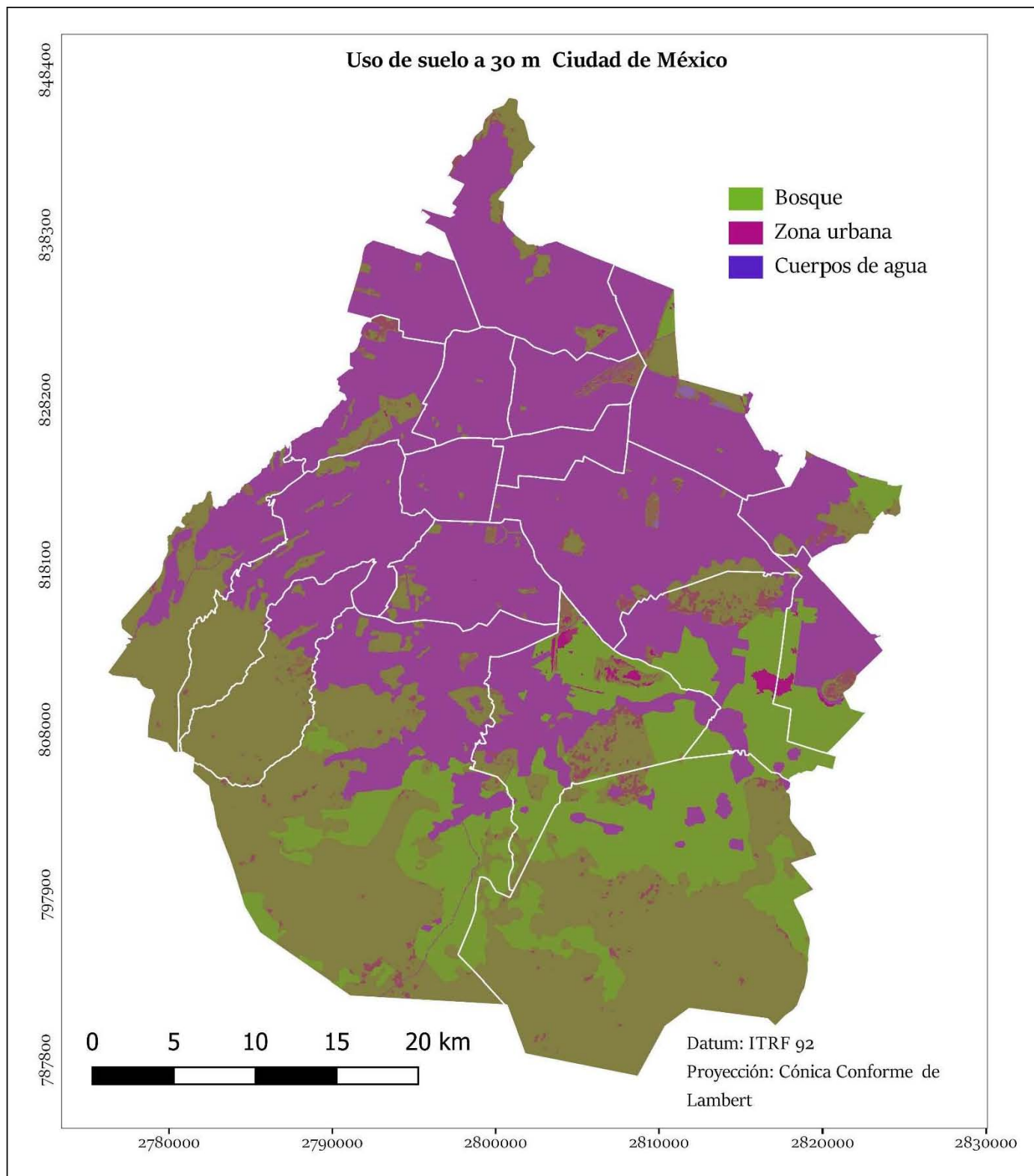
A.5 Estaciones Climatológicas en Ciudad de México
Fuente: Datos generados a partir de CENAPRED (Domínguez, 2012)



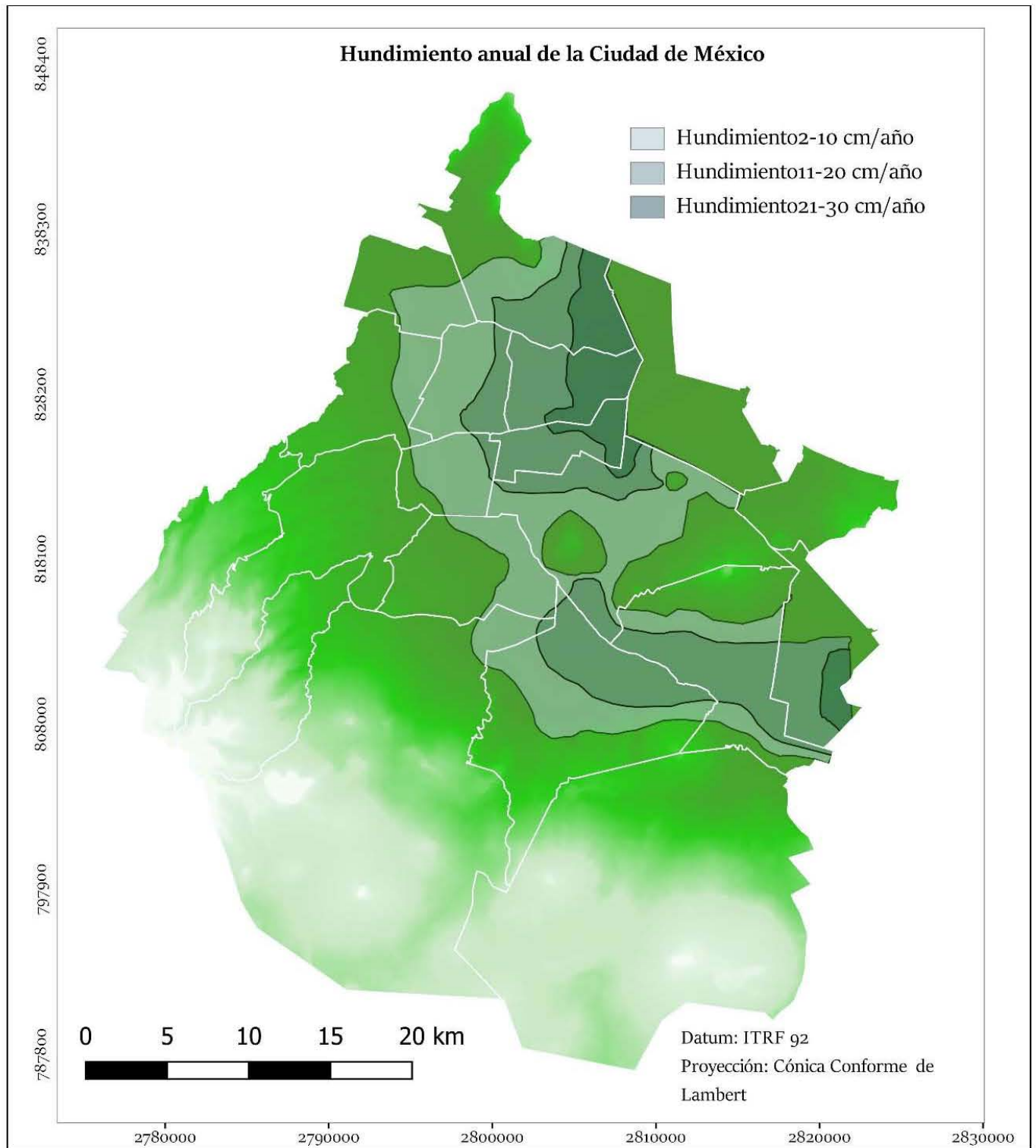
A.6 Precipitación espacial máxima en 100 años para Ciudad de México
Fuente: Construido con información de CENAPRED (Domínguez et al., 2012)



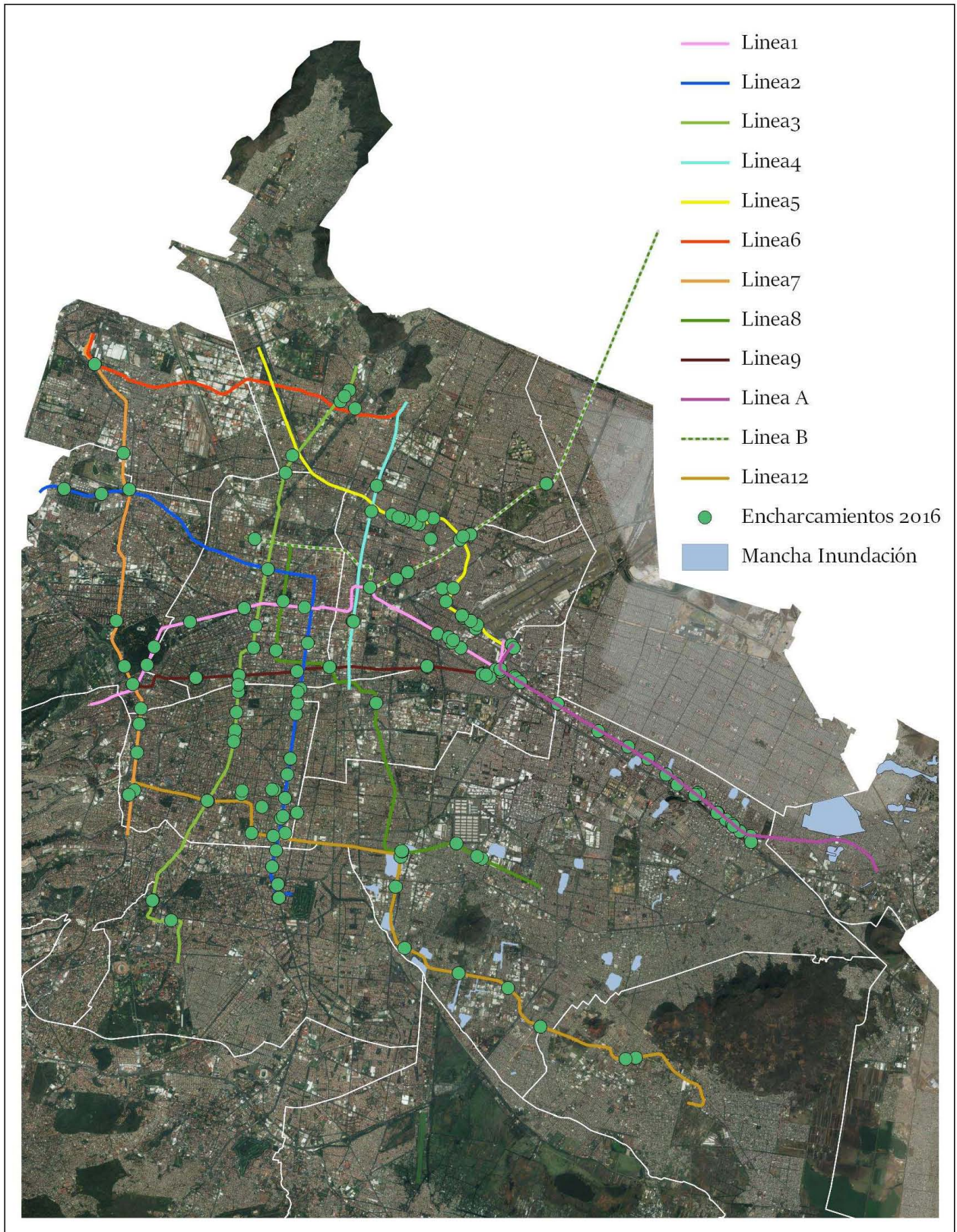
A.7 Estaciones OH



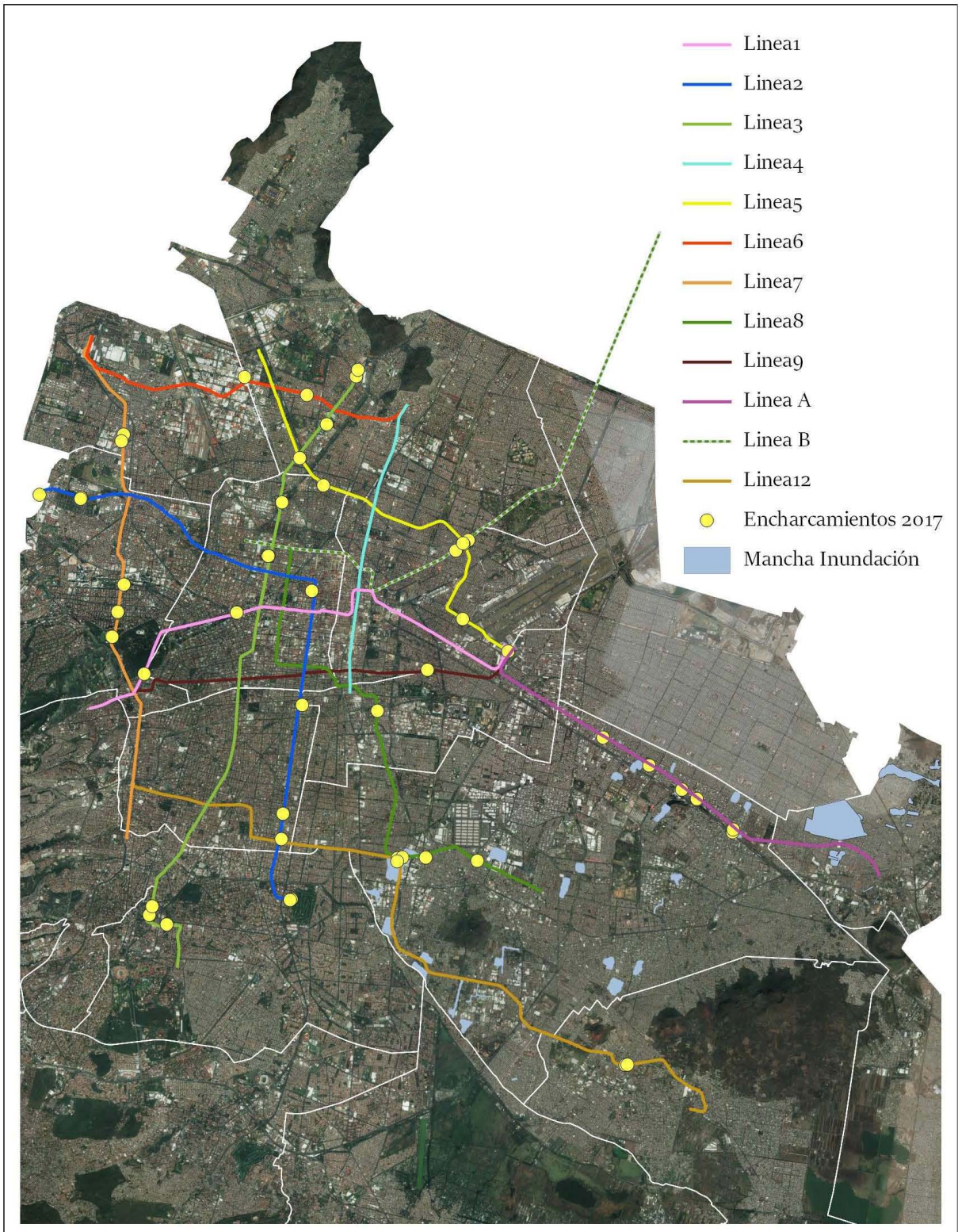
A.8 Uso de suelo en Ciudad de México
Fuente: GLC30 (Chen, 2014)



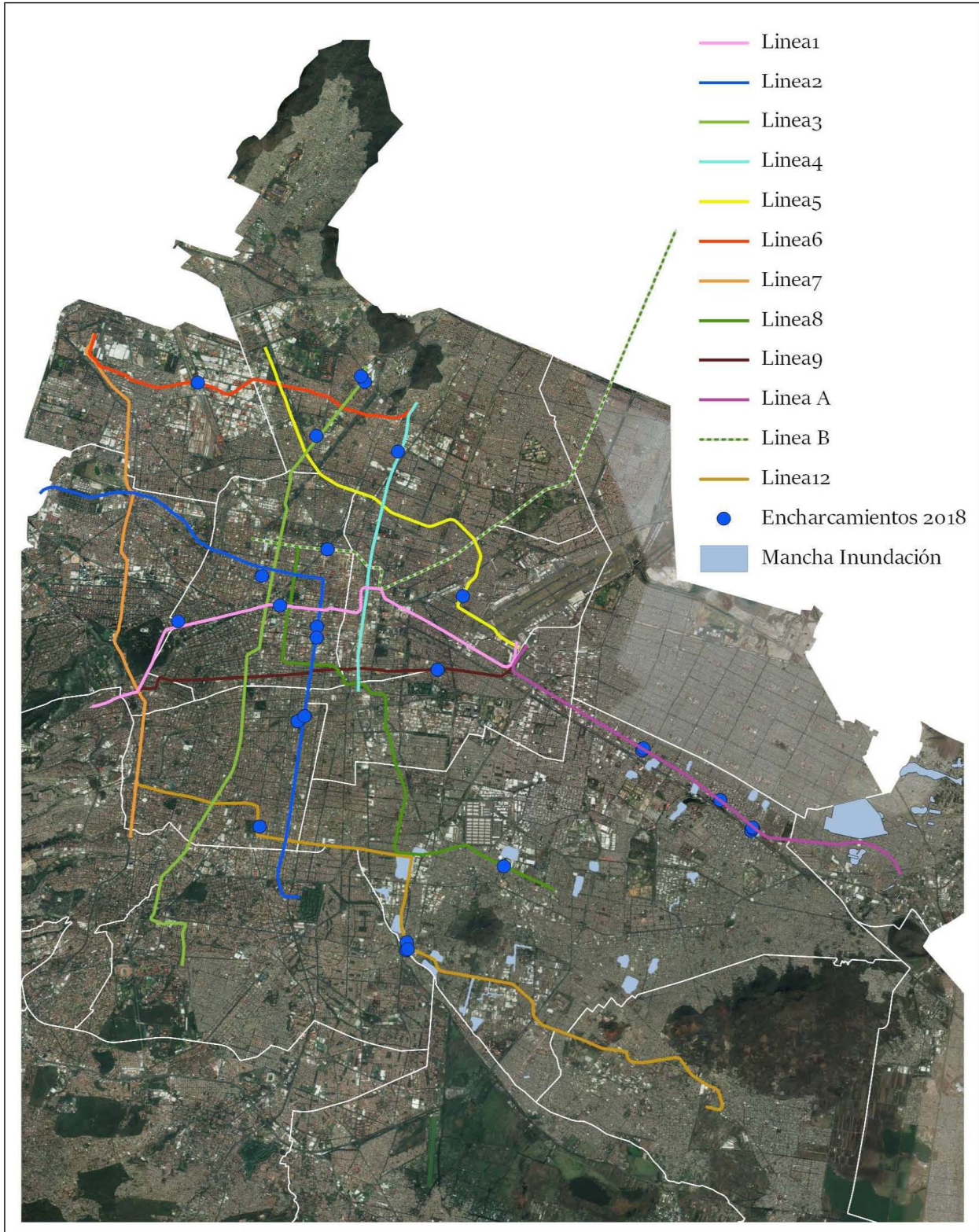
A.9 Hundimiento anual de la Ciudad de México
 Fuente: Atlas de Riesgo de la Ciudad de México (2018)



A.10 Encharcamientos cercanos a estaciones del Metro 2017
 Fuente: Atlas de Riesgo de la Ciudad de México (2016)



A.11 Encharcamientos cercanos a estaciones del Metro 2017
 Fuente: Atlas de Riesgo de la Ciudad de México (2017)



A.12 Encharcamientos cercanos a estaciones del Metro 2018
Fuente: Atlas de Riesgo de la Ciudad de México (2018)