



**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

*Laboratorio de Geoinformática  
Coordinación de Geotecnia*

## INFORME FINAL

Dirección General del METROBÚS de la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE)  
del Gobierno de la Ciudad de México

*PROYECTO:*

**REALIZACIÓN DE LAS INVESTIGACIONES Y ESTUDIOS  
DEL SUBSUELO EN EL TRAMO COMPRENDIDO ENTRE  
SAN LÁZARO Y LA GLORIETA DE VAQUERITOS  
DE LA AMPLIACIÓN DE LA LÍNEA 5 DEL METROBÚS**

Agosto, 2019

## 1. PLANTEAMIENTO Y ALCANCE

La Línea 5 del METROBÚS se construye con el objetivo de ofrecer transporte digno y seguro en casi 50 colonias de las alcaldías Coyoacán, Iztacalco, Iztapalapa, Tlalpan y Venustiano Carranza. Tendrá conexión con cuatro líneas del Metro: 1, 8, 9 y B, con dos líneas del METROBÚS: 2 y 4 y con la Terminal de Autobuses de Pasajeros de Oriente (TAPO). Facilitará el traslado de 135 mil personas al día con accesibilidad garantizada y con una reducción de casi 30 por ciento en los tiempos de traslado.

Las autoridades de la Dirección General del METROBÚS de la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE) del Gobierno de la Ciudad de México iniciarán muy pronto la construcción de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS, así como del inmobiliario urbano del área de influencia del trazo del mismo (Figura 1).



Fig. 1. Trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS.

Conscientes de las características excepcionales del subsuelo de la Ciudad de México que siempre han dificultado la labor de los constructores, la Dirección General del METROBÚS ha solicitado al Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM su asesoría para la caracterización geotécnica del subsuelo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS.



Esta asesoría se enfoca a evaluar la problemática que podrían plantear tanto las características físico-geográficas como las condiciones del subsuelo en las que se desenvuelve el trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y del área de influencia del proyecto (Figura 1). Se pretende así orientar a los diseñadores y constructores para que tomen previsiones y revisen sus sistemas y procedimientos constructivos para cada tramo de la estructura vial del METROBÚS.

También, se revisa la problemática que plantean las anomalías geotécnicas detectadas a lo largo del trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y en el área de influencia del proyecto. Se aporta información útil acerca del hundimiento regional y del agrietamiento con el fin de que se verifiquen sus eventuales efectos y con ello, se minimicen las consecuencias indeseables durante la vida útil de la obra.

## 2. MARCO GEOGRÁFICO-FÍSICO DEL PROYECTO

En este apartado, se presenta una evaluación del marco geográfico-físico del área de influencia del proyecto de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS. Además de las características físico-geográficas, se describen las condiciones del subsuelo de las zonas que atraviesa el trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS con el propósito de que los contratistas tomen las previsiones necesarias para el diseño geotécnico, así como para la selección de los sistemas, equipos y procedimientos constructivos.

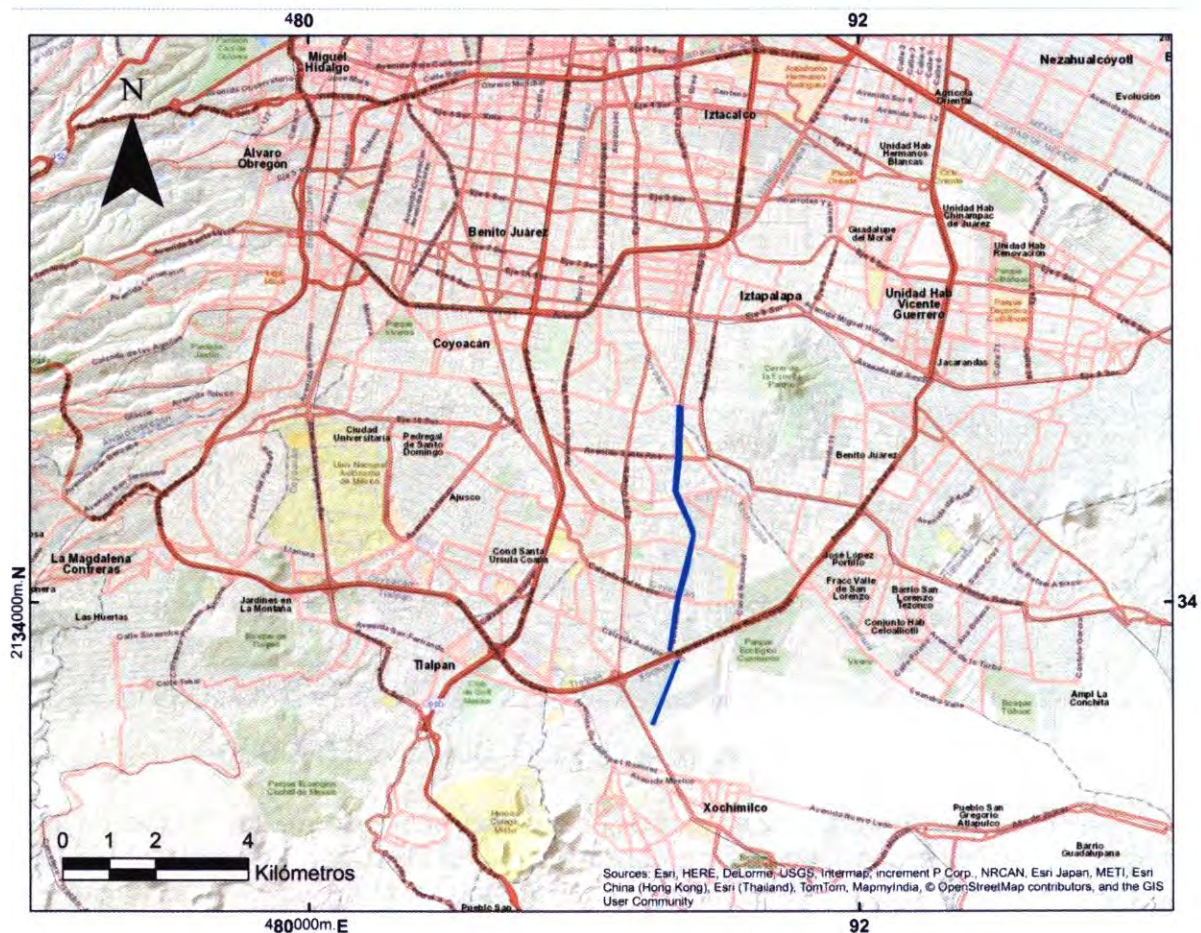


Fig. 2. Trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y área de influencia del proyecto.



## 2.1 Cartografía histórica

En el presente estudio, se ha tomado muy en cuenta la información contenida en la cartografía histórica y en los mosaicos de fotografías aéreas antiguas, los cuales dan cuenta de las condiciones prehispánicas y de la evolución de la zona de estudio, dejando ver las transformaciones que tuvieron lugar a través del tiempo.

En la lámina de la Figura 3, se puede observar la evolución que ha registrado la zona de influencia del proyecto del METROBÚS en cuanto a sus características físico geográficas desde 1899 (Con base en la estupenda Carta Corográfica del Distrito Federal, construida por la Secretaría de Fomento por disposición del Secretario Ingeniero Manuel Fernández Leal).

Cabe destacar que la Figura 3 muestra el pasado lacustre y de pantanos que tiene la zona de influencia por donde se ubica y extiende el trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS, permitiendo advertir tanto a los diseñadores como a los constructores de esta obra sobre los antecedentes de la zona.

Se observa que el proyecto se encuentra fuera de las zonas de invasión-regresión del lago de Xochimilco que afectaban las orillas del lago en el siglo XIX.

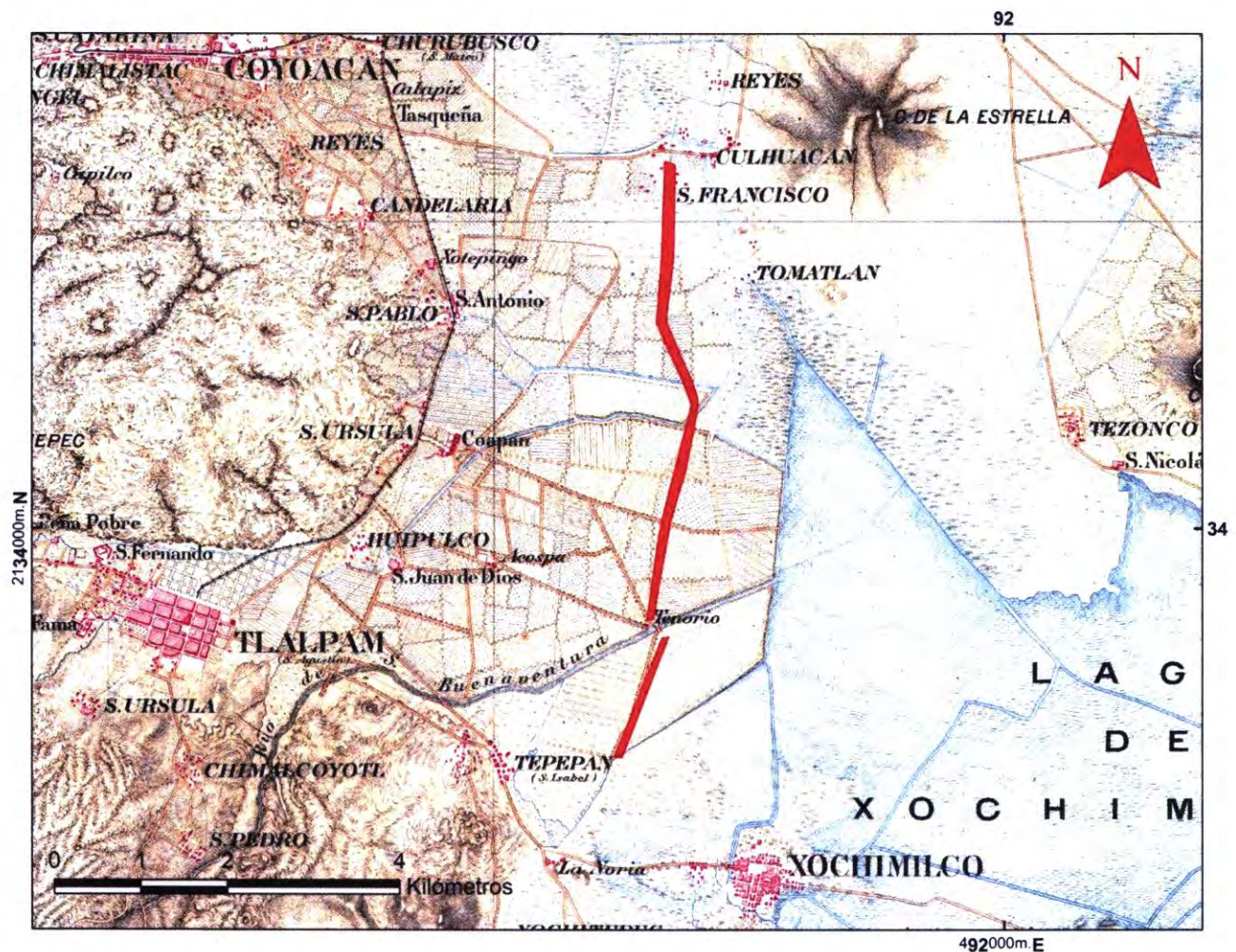


Fig. 3. Trazo del METROBÚS bajo el contexto de 1899, Manuel Fernández Leal.

De acuerdo con la Carta Hidrográfica de Manuel Fernández Leal de 1899, en el cruce con la calzada Taxqueña, se ubica una calzada dique. Los restos de este terraplén antiguo constituyen una anomalía geotécnica que requerirá una atención especial por parte de los diseñadores para garantizar un comportamiento uniforme del subsuelo en el que se apoyará la carpeta de concreto hidráulico.

Otro aspecto significativo en Trazo del METROBÚS bajo el contexto de 1899 es el cruce de tres canales y el del Río San Buenaventura; los cuales constituyen cuatro anomalías geotécnicas que deben tenerse en cuenta, para evitar un comportamiento no uniforme del subsuelo en el que se apoyará la estructura vial del METROBÚS.

## 2.2 Topografía

La información relativa a la topografía es fundamental para cualquier actividad que se desee realizar en la zona por donde se extiende el trazo de la Línea 5 – Sur del METROBÚS, debido a que permite valorar la superficie física del terreno, con base en la planimetría y altimetría, y las formas y dimensiones de laderas, ríos, volcanes, calderas, conos, fallas, grietas, líneas o superficies de contacto, discontinuidades, valles, cuencas, etc.

La interpretación de las características y rasgos generales del relieve (abrupto, medio, suave o plano) ayuda a definir la extensión de los depósitos de suelo, rellenos y formaciones geológicas mediante la proyección horizontal en un plano. Generalmente, el relieve se presenta a través de curvas de nivel indicando su cota, definida como su altura sobre el nivel del mar. También sirve como mapa de fondo para enmarcar los datos de los diferentes estudios que requieren de los rasgos generales de la superficie para elaborar y definir nuevos mapas temáticos (geomorfológicos, orográficos, etc.).

Bajo el nombre de Modelo Digital del Terreno, MDT, se entiende al conjunto de datos numéricos que describen las características del terreno. Los MDT son una versión digital de los mapas topográficos convencionales por lo que, en ocasiones, han sido denominados mapas virtuales. Un MDT puede definirse en forma más completa y precisa como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (altura o elevación, pendiente, etc).

El modelo de relieve sombreado de la zona de interés (Figura 4) muestra que el trazo del METROBÚS estudiado cruza una zona esencialmente plana, sin accidentes topográficos, información que resulta útil al constructor y diseñador.



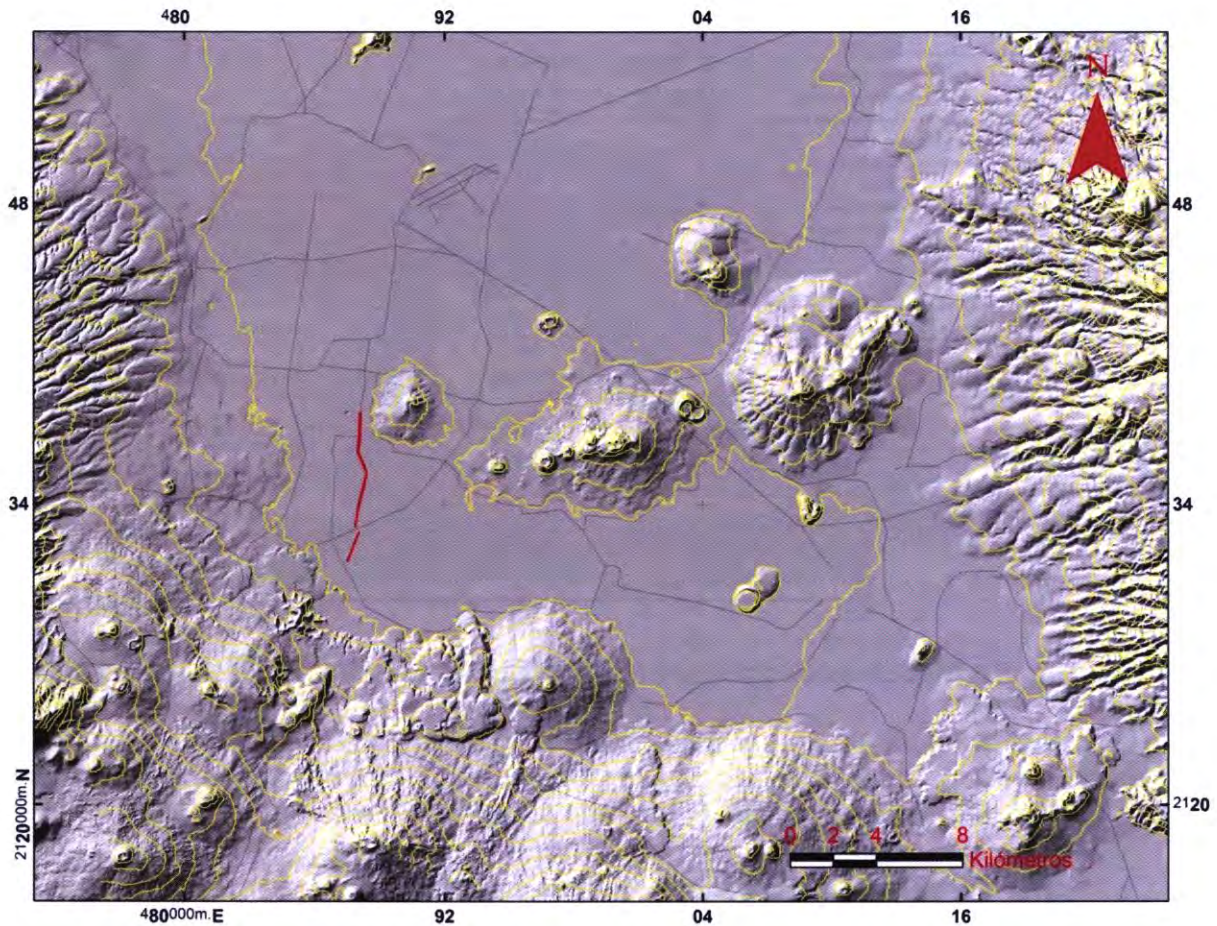


Fig. 4. Trazo del METROBÚS bajo el contexto del Modelo de Relieve Sombreado.

### 2.3 Geología

Es fundamental que los constructores y diseñadores tengan una idea clara del marco geológico regional y local en el que se desarrolla el proyecto del METROBÚS, el cual se intenta sintetizar en los siguientes párrafos y láminas.

La ciudad de México se localiza dentro de la Cuenca de México, misma que se ubica en la porción centro-oriental del Cinturón Volcánico Mexicano. Ésta es una cuenca endorréica con altitud media de 2240 m.s.n.m. Los elementos morfológicos más importantes son sus límites naturales y algunos rasgos geológicos internos, destacando la Sierra de las Cruces-Monte Alto (límite sudoccidental), la Sierra Nevada (límite sudoriental) y la Sierra de Chichinautzin (límite sur), siendo esta última frontera la que cerró la cuenca en el Cuaternario Superior, hace unos 600 000 años (Santoyo *et al.*, 2005).

A grandes rasgos, la columna estratigráfica de la Cuenca de México pone en evidencia tres grandes grupos: calizas del Cretácico, rocas volcánicas del Terciario y vulcanitas propias del cierre de la cuenca para finalizar con depósitos aluviales y lacustres del Cuaternario.

La lámina de la Figura 5 exhibe el Modelo geológico general de la Cuenca de México, (Mooser 2018); el cual, revela la distribución espacial de los principales rasgos de las estructuras geológicas.



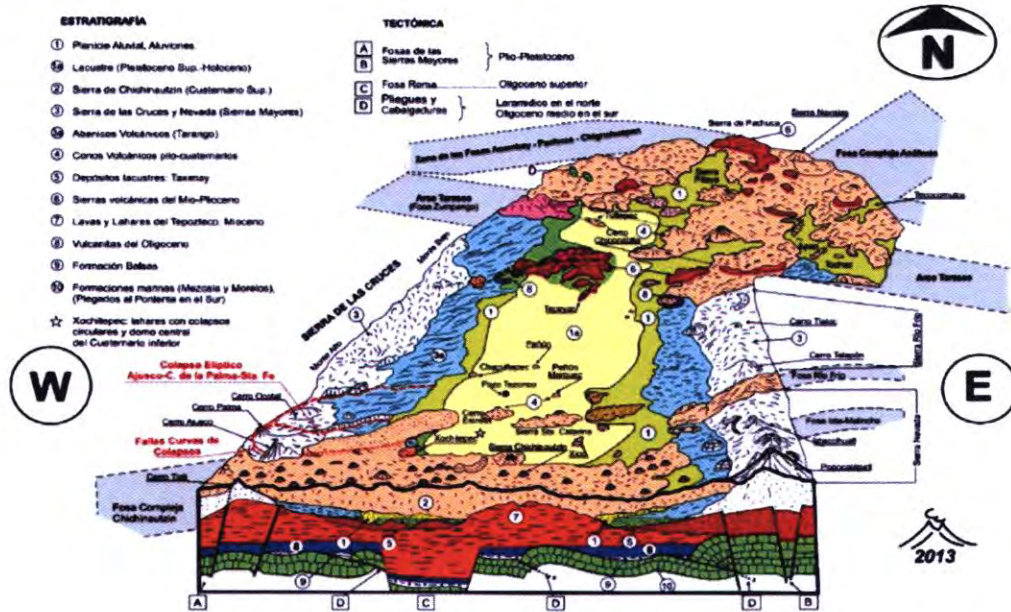


Fig. 5. Modelo geológico general de la Cuenca de México, (Mooser, 2018).

En la lámina de la Figura 6, se presenta el mapa geológico detallado de la zona centro de la ciudad de México (Mooser *et al.* 1996) en el cual es fácil identificar las condiciones geológicas en las que se desarrolla el Trazo del METROBÚS (zona de sedimentos lacustres).

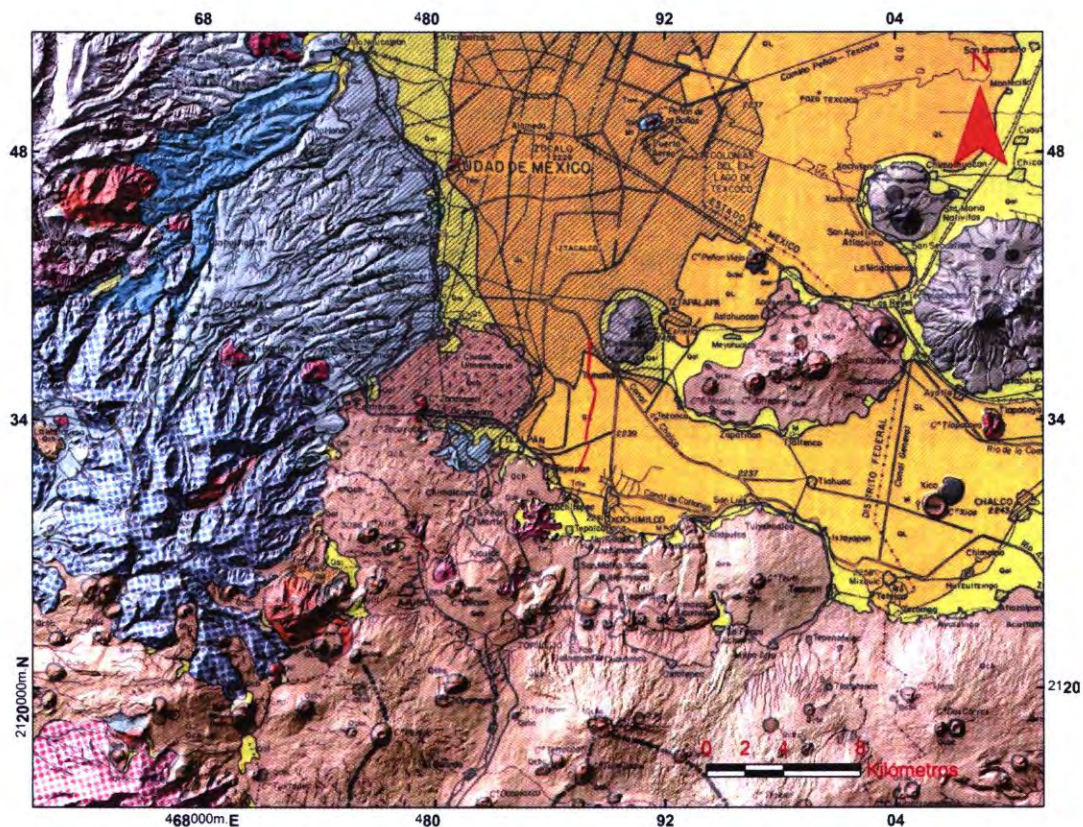


Fig. 6. Trazo del METROBÚS bajo el contexto de la Geología regional, (Mooser *et al.* 1996).



#### 2.4.1 Localización del trazo del METROBÚS en la zonificación geotécnica

El tramo de Calzada de Taxqueña a Calzada de las Bombas del trazo de la Línea 5 del METROBÚS coincide con la Zona II (Transición), en la que los depósitos profundos se encuentran a menos de 20 metros de profundidad, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros.

7 de 22



metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales. El espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m.

En la Figura 8, se muestra el trazo del METROBÚS bajo el contexto de la zonificación geotécnica.

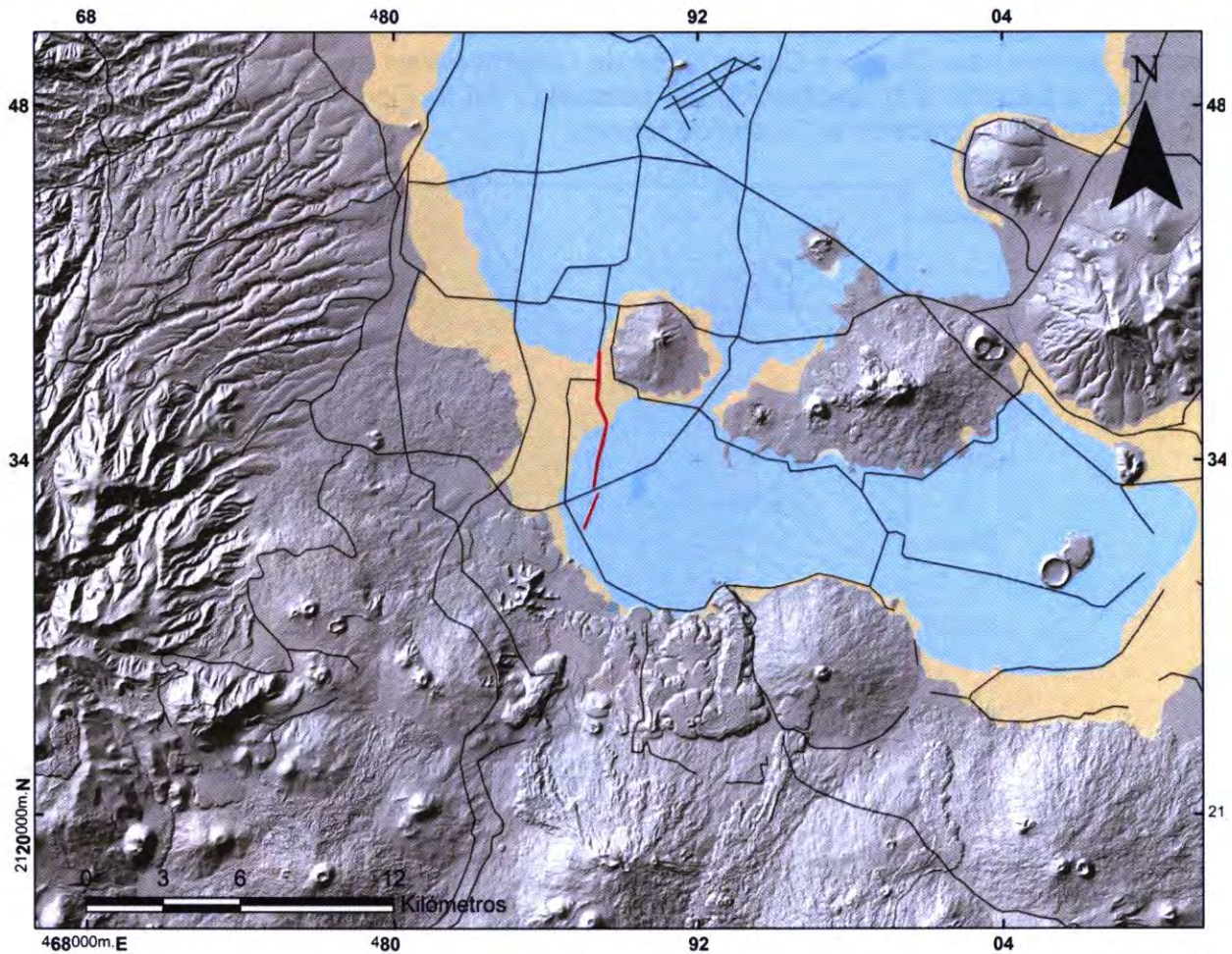


Fig. 8. Trazo del METROBÚS bajo el contexto de la zonificación geotécnica.

El trazo del METROBÚS se encuentra por tanto en zonas que fueron anteriormente lacustres con espesor variable de los sedimentos lacustres.

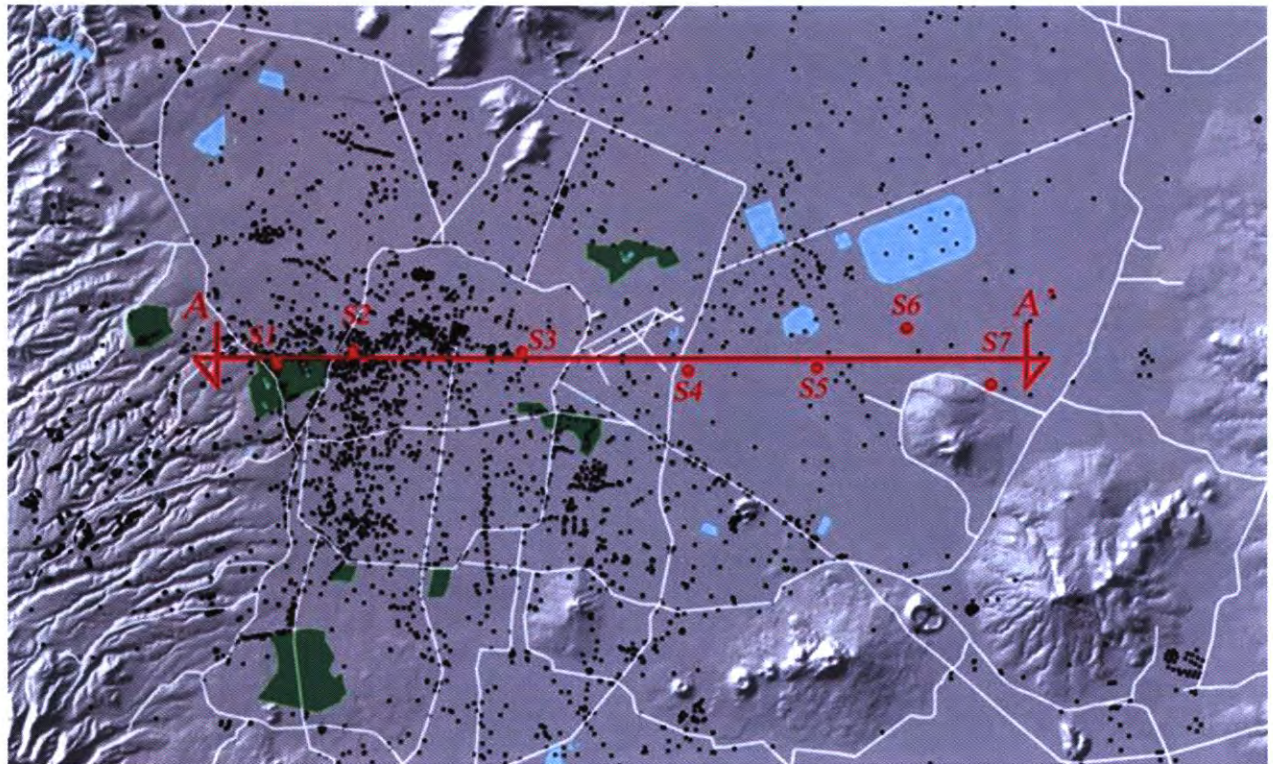
#### 2.4.2 Información detallada sobre el subsuelo

La información puntual sobre el subsuelo proporcionada por los diferentes sondeos geotécnicos disponibles representa el elemento más significativo para definir el modelo estratigráfico que permita caracterizar los rasgos generales del subsuelo en el área de influencia del proyecto de la Línea 5 – Sur del METROBÚS. Lo anterior se debe a que proporcionan la información de detalle acerca de la variación con la profundidad de la estratigráfica y propiedades de los estratos que integran al subsuelo.

Para ello, se recurrió a la construcción de un Sistema de Información Geográfica local que contenga almacenados en formato digital a los diferentes sondeos geotécnicos disponibles.

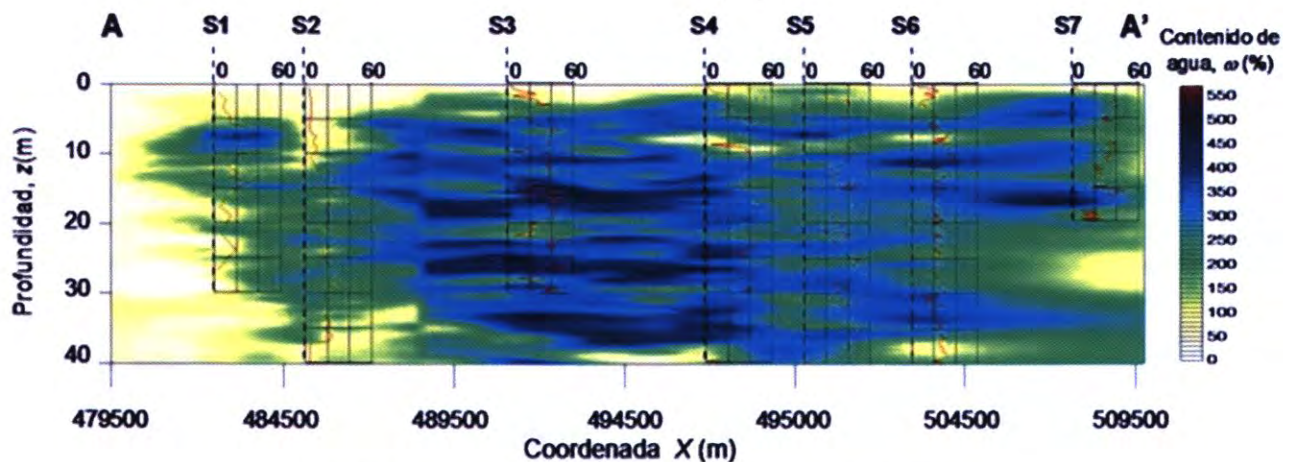


En la parte superior de la lámina de la Figura 9, se muestra la distribución espacial de los sondeos existentes en la zona centro de poniente a oriente y un corte representando la variación espacial del contenido de agua.



● SONDEOS DE REFERENCIA

Ubicación de sondeos y eje de corte



Corte A-A' estimado y sondeos de referencia

Fig. 9. Estimación de la variación espacial del contenido de agua, Corte A – A'.



En cambio, en la Figura 10, se muestra el trazo del METROBÚS bajo el contexto de la distribución espacial del espesor de los suelos blandos.

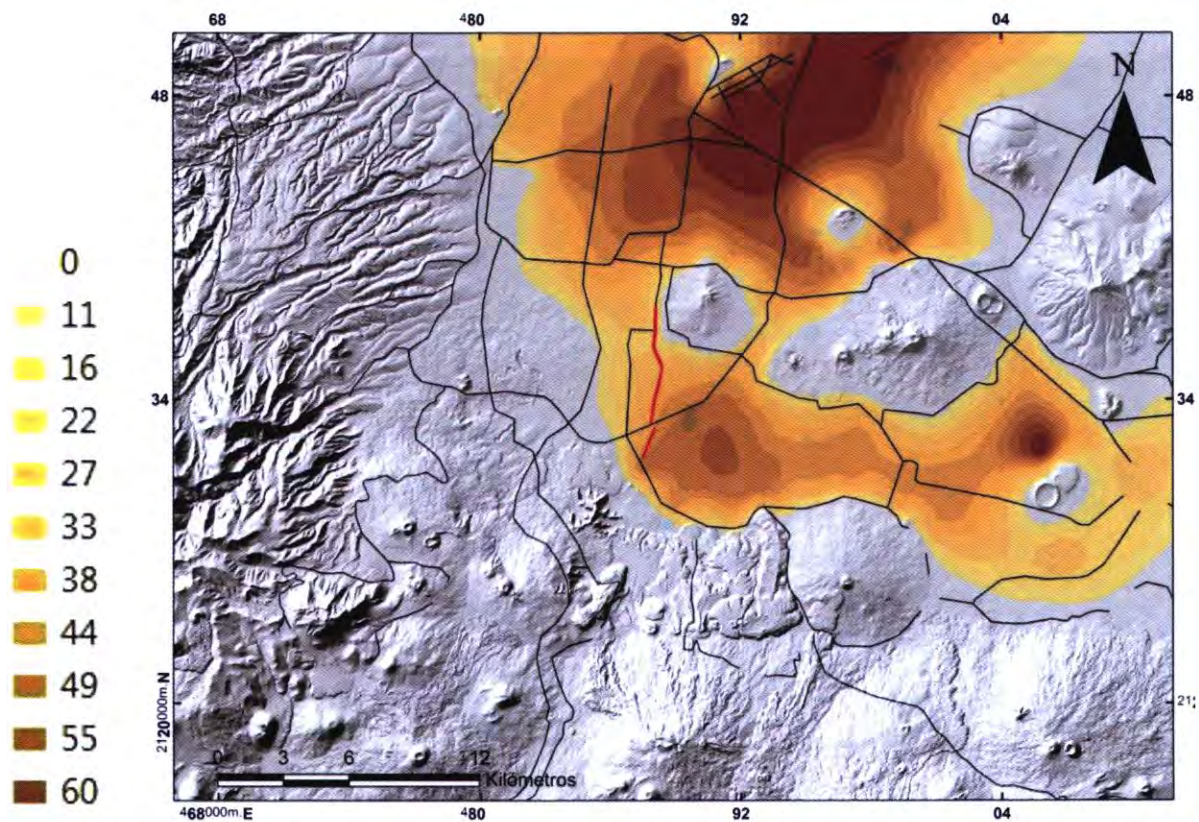


Fig. 10. Trazo del proyecto bajo el contexto de espesor de suelos blandos en metros.

Se confirma por tanto que el trazo del METROBÚS cruza zonas que fueron anteriormente lacustres con espesor variable de los sedimentos. En etapas posteriores de este proyecto, se podrá definir un perfil estratigráfico estimado a lo largo del trazo del METROBÚS recurriendo a la base de datos del II-UNAM y a la geoestadística.

#### 2.4.3 Análisis de la distribución espacial de las propiedades geotécnicas del subsuelo.

La variación espacial de las propiedades y características estratigráficas del subsuelo se atribuye principalmente al proceso de formación geológica cuya complejidad es tal que en general puede considerarse como aleatorio. Por tanto, con la finalidad de realizar una mejor caracterización geotécnica, se aplica la metodología Geoestadística para estudiar la distribución espacial del contenido de agua y definir la profundidad y espesores de las formaciones típicas del subsuelo en el Valle de México. Como resultado se presenta una sección transversal (cortes virtuales) del contenido de agua estimado que describe la configuración de la distribución espacial de la propiedad analizada.

Lo anterior se debe a que el contenido de agua,  $w(\%)$ , es la propiedad de los suelos que más destaca (especialmente para materiales cohesivos), debido a las correlaciones que presenta con las propiedades mecánicas; además, es la propiedad que en la práctica se determina en mayor número y a menor costo en un estudio geotécnico.



#### 2.4.3.1 Distribución espacial del contenido de agua

Para el análisis de la distribución espacial del contenido de agua, se empleó la metodología geoestadística como herramienta para determinar la distribución espacial de las propiedades anteriormente descritas.

Los conceptos teóricos principales del método geoestadístico han sido presentados en otros trabajos (Juárez, 2001; Auvinet, 2002; Juárez, 2015). Por tanto, en este trabajo únicamente se presentan los resultados de las aplicaciones.

En el análisis de la distribución espacial de los datos de contenido de agua  $w(\%)$ , se consideraron sondeos de penetración estándar, sondeos mixtos y sondeos selectivos existentes, próximos al trazo de la Línea 5 del METROBÚS que alcanzan una profundidad de exploración variable entre 10 y 30m. En la tabla 1, se indica el número de sondeos utilizados en este análisis y en la Figura 11 se muestra la ubicación de los sondeos respecto al trazo de la Línea 5 del METROBÚS.

Tabla 1. Sondeos empleados en el análisis geoestadístico.

| Tipo de sondeos                      | Número |
|--------------------------------------|--------|
| Sondeo mixto (SM)                    | 8      |
| Sondeo de penetración estándar (SPT) | 32     |
| Sondeo selectivo (SS)                | 12     |
| Total =                              | 52     |



Fig. 11. Localización del trazo de la Línea 5 del METROBÚS y sondeos utilizados en el análisis geoestadístico del contenido de agua.



#### 2.4.3.1.1 Definición del dominio del campo aleatorio

El dominio del campo aleatorio queda constituido por el espacio  $R^p$  con  $p=3$  (volumen de suelo, 3D), el conjunto de valores medidos de  $w(\%)$ , constituyen una muestra del campo aleatorio.

#### 2.4.3.1.2 Análisis estadístico

Como primera evaluación de la variabilidad espacial del subsuelo, se obtienen parámetros estadísticos (media, desviación estándar y coeficiente de asimetría) de la propiedad antes definida. En el análisis geoestadístico de las propiedades geotécnicas, se aceptan la hipótesis de homogeneidad y ergodicidad, es decir, que sus parámetros estadísticos pueden ser estimados a partir de una sola realización. En la tabla 2 se muestran los parámetros estadísticos de los datos.

Tabla 2. Parámetros estadísticos del contenido de agua.

| Parámetros               | Valores |
|--------------------------|---------|
| Media                    | 125.68  |
| Desviación estándar      | 99.65   |
| Coeficiente de asimetría | 0.8554  |
| Mínimo                   | 10.90   |
| Máximo                   | 486.67  |
| No. de datos             | 2761    |

La tendencia de los datos de contenido de agua se evalúa mediante un análisis de regresión lineal, ajustando una ecuación de la forma:

$$V_R = ax + by + cz + d \quad (1)$$

Donde  $V$  es la propiedad analizada (contenido de agua), " $x, y, z$ ", son las coordenadas que definen la posición de los datos y " $a, b, c$  y  $d$ " son los coeficientes de regresión lineal. Los coeficientes de regresión lineal se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Coeficientes de regresión de los datos de contenido de agua.

| Coeficiente de regresión lineal | Valor    |
|---------------------------------|----------|
| $a$                             | 0.00464  |
| $b$                             | 0.00107  |
| $c$                             | 0.15173  |
| $d$                             | -4762.77 |

En las Figura 12 a 14, se muestra la distribución de los datos a lo largo de los ejes ( $X, Y, Z$ ).



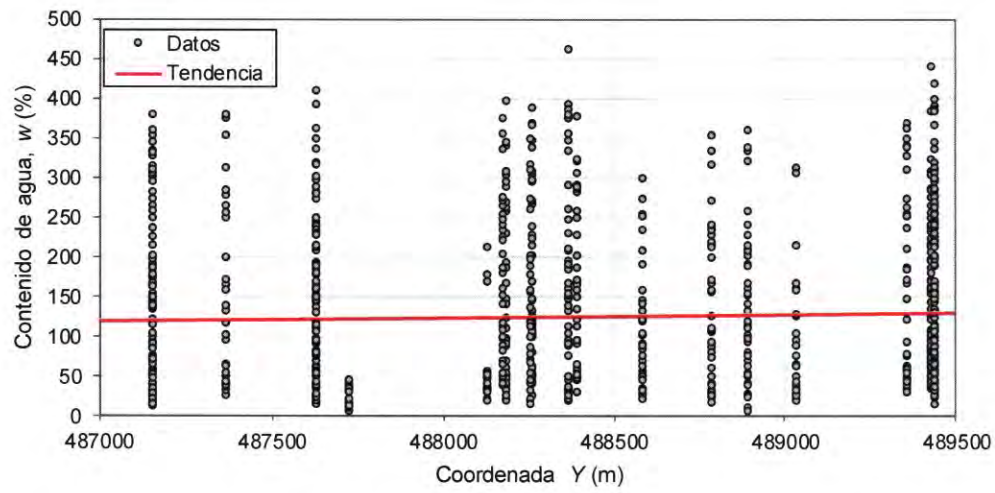


Fig. 12. Distribución de los datos en la zona de estudio a lo largo de la coordenada X.

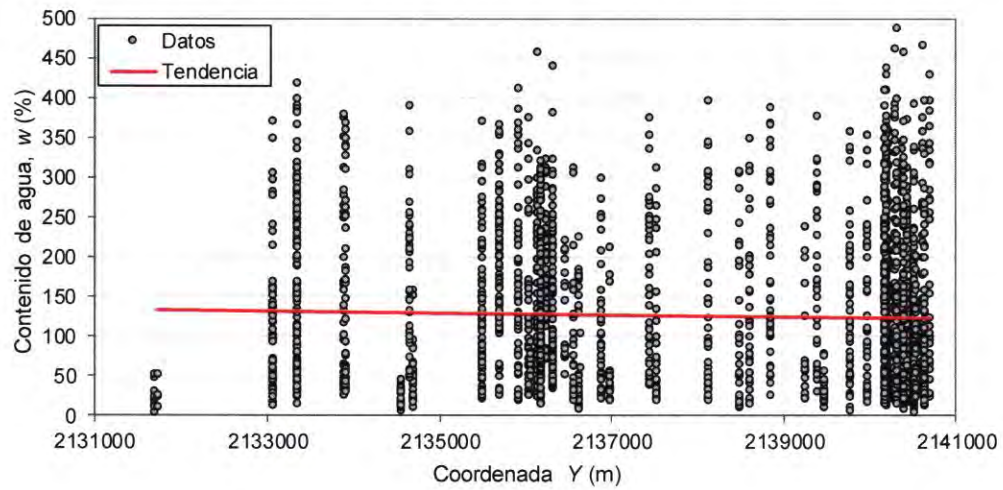


Fig. 13. Distribución de los datos en la zona de estudio a lo largo de la coordenada Y.



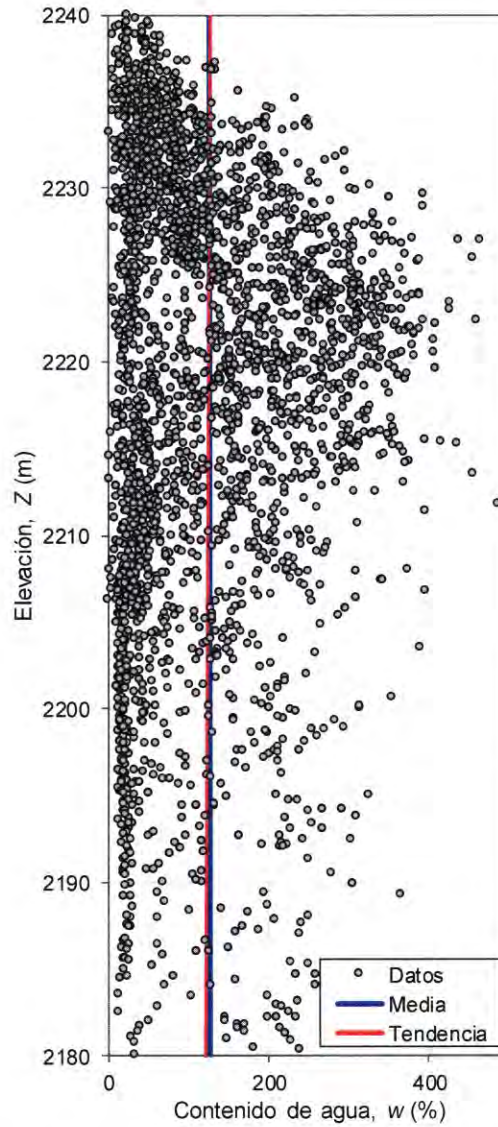


Fig. 14. Distribución de los datos en la zona de estudio a lo largo de la profundidad Z.

#### 2.4.3.1.3 Análisis estructural

La correlación entre datos de contenido de agua, se evalúa en dirección horizontal a cada 100m y en dirección vertical a cada 0.25m, estimando el coeficiente de autocorrelación a lo largo de la dirección  $\mathbf{u}$  (horizontal y vertical) con la ecuación:

$$C_v(\lambda \mathbf{u}) \cong \frac{1}{L} \int_0^L V(x)V(x + \lambda \mathbf{u})dx - \mu_v^2 \quad (2)$$

donde,  $\mathbf{u}$  es el vector unitario en la dirección en la que se evalúa la covarianza de la propiedad de interés y  $\lambda$  es un escalar. El correlograma experimental resultante se muestra en la Figura 5.

La distancia de correlación,  $\delta = 2a$ , se estima a partir de los correlogramas experimentales, definiéndose a como:



$$a = \int_0^{\lambda_c} \rho(\lambda u) d\lambda \quad (3)$$

siendo:  $\lambda_c$  es el valor crítico de  $\lambda$  donde  $\rho$  se anula por primera vez.

Con base en los correlogramas experimentales se determinan las distancias de correlación, resultando  $\delta_{hor} = 2400\text{m}$  y  $\delta_{ver} = 3\text{m}$ .

Los modelos de correlación horizontal y vertical (Figura 15), se definen ajustando los correlogramas experimentales a una función matemática que incluya las correspondientes distancias de correlación. En este trabajo, se adopta una función de tipo exponencial de la forma:

$$\rho(h) = \exp\left(-\frac{2|h|}{\delta}\right) \quad (4)$$

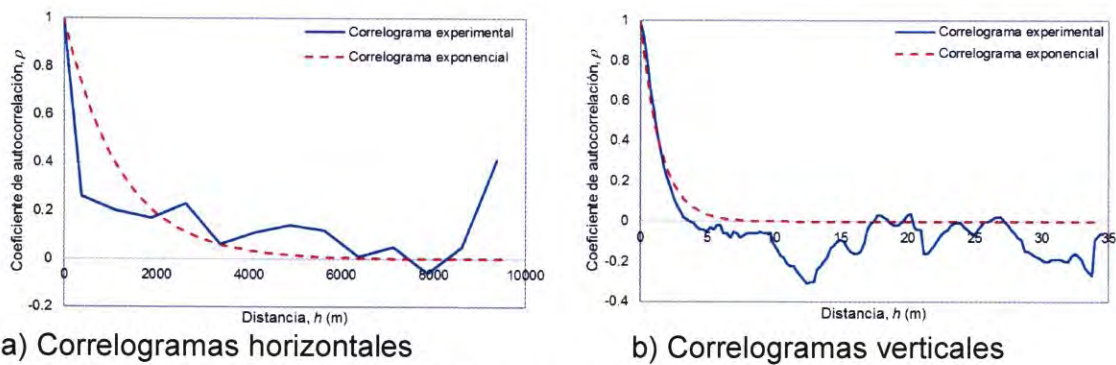


Fig. 15. Modelos de correlación espacial del contenido de agua.

#### 2.4.3.1.4 Estimación puntual

Con base en los datos de los sondeos disponibles, los modelos de correlación espacial previamente definidos y las distancias de correlación espacial ( $\delta_{hor}$  y  $\delta_{ver}$ ), se estima un perfil a lo largo de un eje preferencial, empleando la técnica de Kriging (Krige, 1962; Matheron, 1965, Auvinet, 2002).

El eje preferencial se definió sobre una línea de sondeos virtuales a cada 100 m, a lo largo del eje del trazo de la Línea 5 del METROBÚS, desde Xochimilco hasta Iztapalapa (Figura 16), con separaciones verticales a cada 0.25m desde la superficie y hasta la elevación 2180.



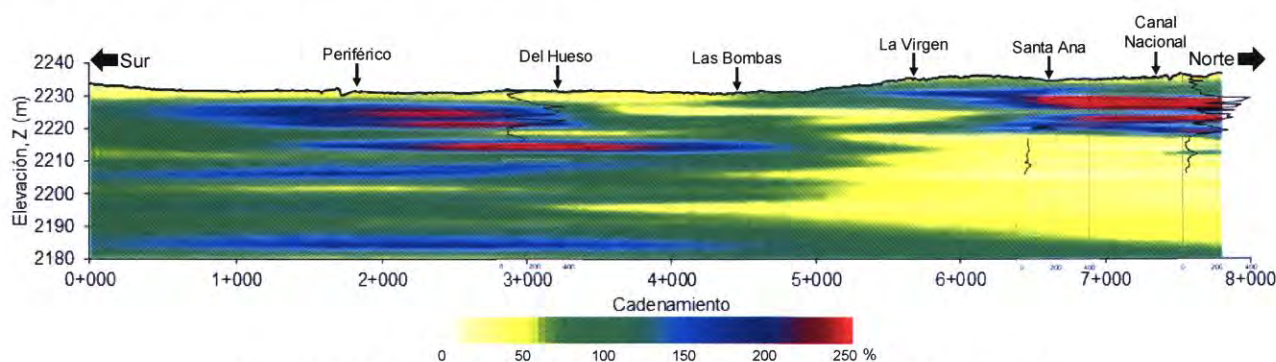
Fig. 16. Eje del trazo de la Línea 5 del METROBÚS.



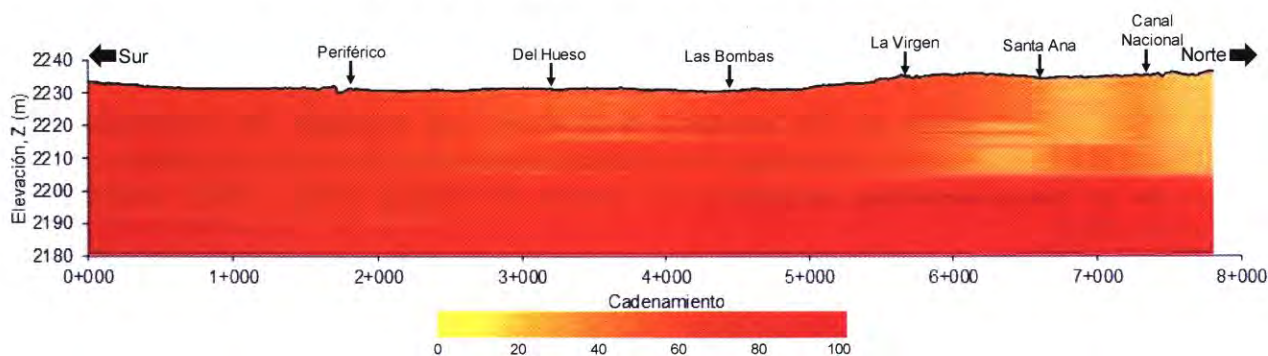
### 2.4.3.1.5 Interpretación de resultados

Para facilitar la interpretación de los resultados numéricos de la estimación puntual se recurre al empleo de herramientas de graficación para construir secciones transversales de las estimaciones. Estas representaciones permiten visualizar la variación espacial de la propiedad analizada. En la Figura 17 se presenta la sección transversal del contenido de agua estimado y la desviación estándar asociada a la estimación.

En la Figura 17 se observa superficialmente una delgada capa de materiales con contenido de agua bajo, estos valores se asocian con la costra superficial desecada o rellenos, bajo esta capa se observa que al sur se tiene un mayor espesor de materiales con contenido de agua mayor a 100%, asociado con arcilla lacustre, se aprecia que este material está intercalado con algunos lentes con valores menores de  $w$ , hacia el norte, los materiales con  $w$  mayor de 100% presentan un espesor menor y les subyacen materiales con valores bajos de  $w$ , asociados a materiales de limo y arena cercanos al Cerro de la Estrella.



a) Sección transversal del contenido de agua estimado,  $w$  (%).



b) Desviación estándar de la estimación (%).

Fig. 17. Sección transversal de la distribución espacial del contenido de agua estimado.

## 2.5 Anomalías geotécnicas

Los esfuerzos realizados por el Instituto de Ingeniería, con la colaboración de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos y el apoyo del Gobierno del Distrito Federal, han permitido mejorar la zonificación geotécnica del Distrito Federal, definiendo con mayor precisión las fronteras que dividen las tres áreas tradicionales consideradas en la zonificación: Zona I (Lomas), Zona II (Transición) y Zona III (Lago) (NTCDCC2017).



La división en tres zonas de la zonificación geotécnica se ha conservado en la reglamentación a través de los años por las grandes ventajas que presenta su sencillez para los ingenieros. Sin embargo, se sabe que existen numerosas subzonas y sitios particulares en los que la estratigrafía local difiere significativamente de la considerada como típica de cada zona. En la zona lacustre por ejemplo existen sitios fácilmente identificables donde el subsuelo presenta características particulares. Destaca en particular el centro histórico donde la existencia de rellenos prehispánicos de gran espesor modifica sustancialmente el comportamiento del subsuelo.

Una situación similar se presenta a lo largo de las trazas de antiguas calzadas o albarradones, en las zonas de canales que fueron rellenados y en los lugares de antiguos asentamientos humanos establecidos en islas artificiales dentro de los ex lagos, conocidas como *tlateles* (Tlatelolco, Tláhuac, Iztacalco, etc.), sin olvidar las zonas de chinampas.

En la Figura 18 se puede apreciar la distribución espacial de las anomalías geotécnicas donde se ha indicado el trazo del METROBÚS. Tomando en cuenta el mapa histórico de la Fig. 3, se pueden contar cuatro interacciones de estas con la estructura vial del METROBÚS.

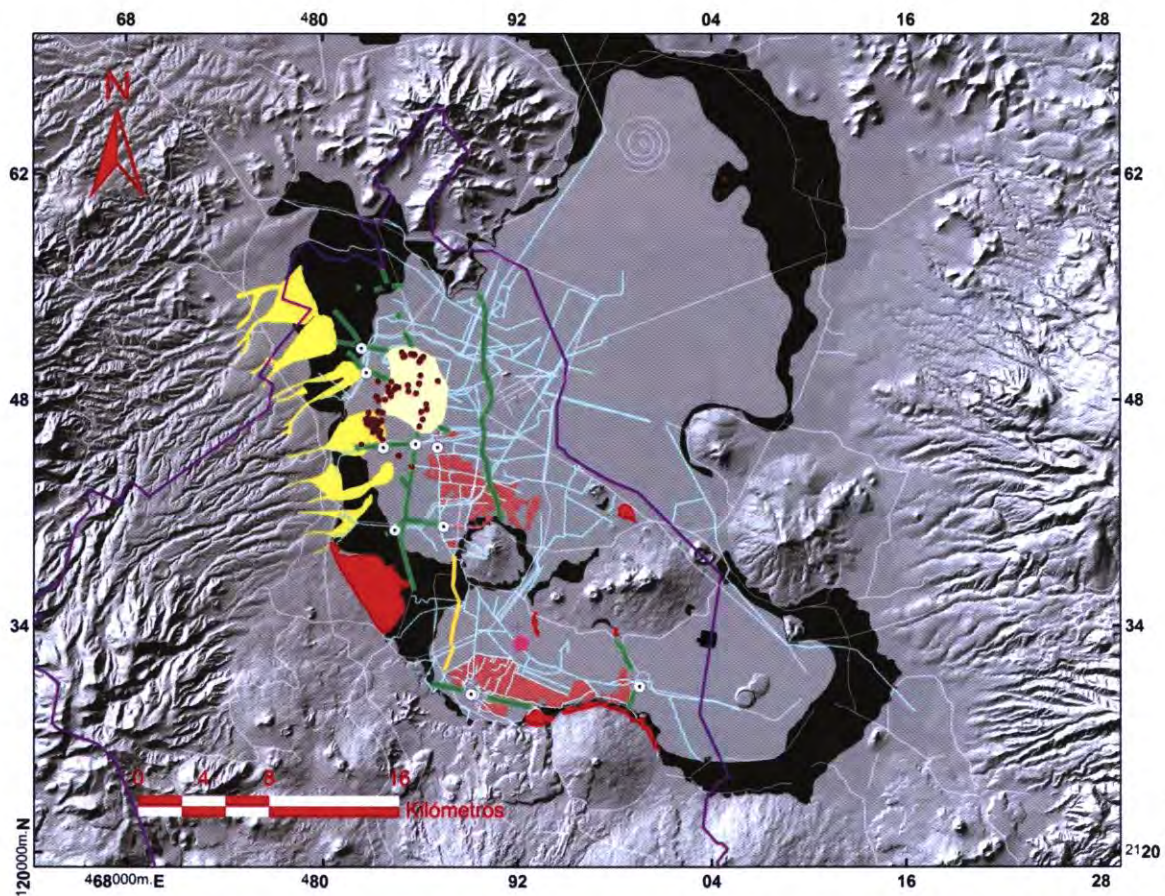


Fig. 18. Trazo del proyecto (amarillo pálido) bajo el contexto de las anomalías geotécnicas.

Estas calzadas prehispánicas, antiguos cauces entubados y canales rellenados constituyen las principales anomalías que deberán tomarse en cuenta para el desarrollo de la ampliación del proyecto de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y de su área de influencia



### 3. HUNDIMIENTO REGIONAL

Una de las formas más económicas de atender el abastecimiento de agua potable ha sido la explotación del acuífero mediante el bombeo de agua con pozos profundos, lo que ocasiona que en la zona lacustre de la Ciudad de México se presente el fenómeno de hundimiento regional. Debido al alto costo de otras alternativas, se prevé que el abastecimiento de agua en la Ciudad continuará por muchos años dependiendo en forma sustancial de los recursos subterráneos.

El fenómeno del hundimiento hoy, a más de noventa años de su descubrimiento por Roberto Gayol, y a más de sesenta años de su explicación científica por Nabor Carrillo (1947), persiste, con efectos acumulados a través del tiempo que causan asentamientos diferenciales en las estructuras coloniales y modernas de la Ciudad de México, así como grietas en el suelo lacustre. Instalaciones metropolitanas tan importantes como el Metro, el Gran Canal y la Red de agua potable sufren también sus efectos.

Por ello, no obstante ser el hundimiento regional un fenómeno antiguo, su estudio y análisis siguen siendo temas de actualidad, pues a pesar de los grandes esfuerzos realizados no ha sido posible controlarlo, obligando a implementar soluciones urgentes para preservar estructuras dañadas y a replantear criterios y estrategias para frenarlo y mitigar sus efectos futuros.

La lámina de la Figura 19, ilustra la hondonada formada en la antigua superficie ocupada por los lagos desde que se inició la extracción de agua mediante pozos profundos en el subsuelo.

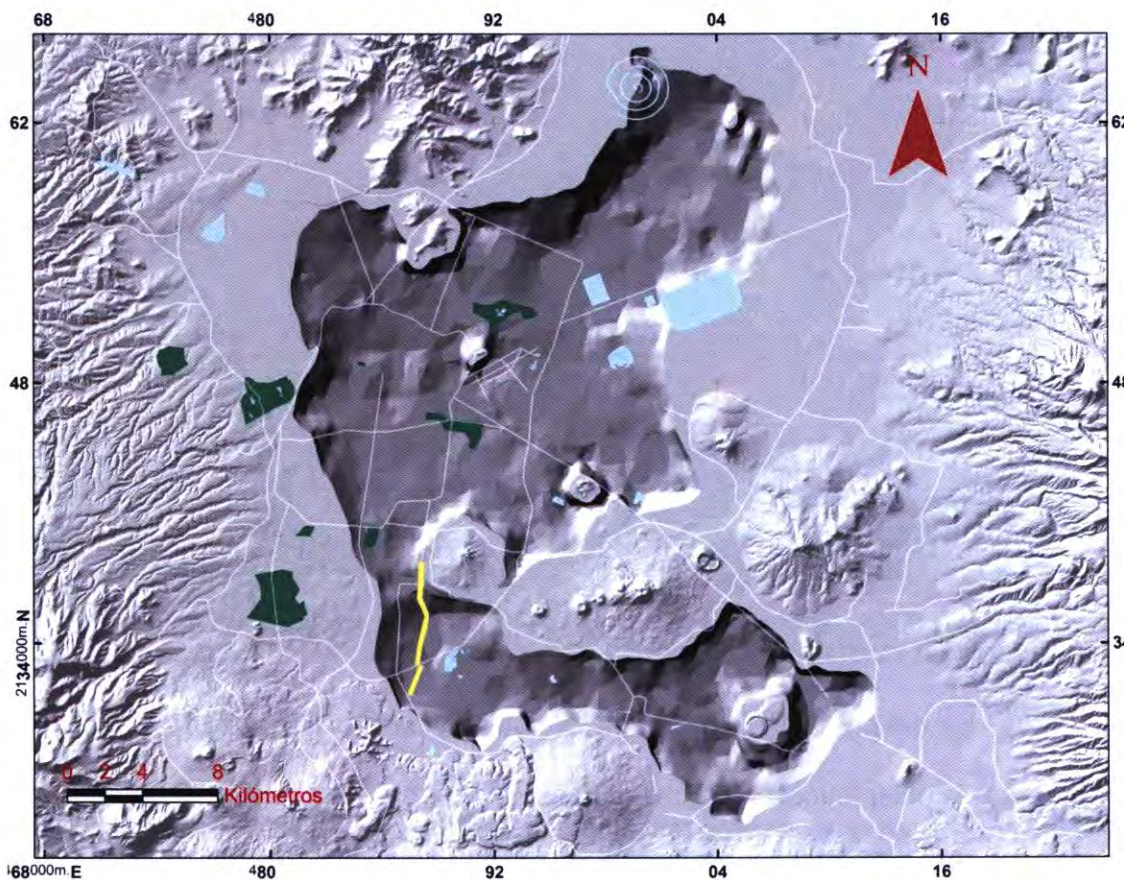


Fig. 19. Hondonada ocasionada por la extracción de agua mediante pozos profundos.



La distribución espacial de las velocidades de hundimiento en el lapso de cuatro años (1999 – 2008) se aprecia en la lámina de la Figura 20, en la que se puede observar que algunos sitios ya han alcanzado velocidades de hundimiento de cerca de 40 centímetros por año.

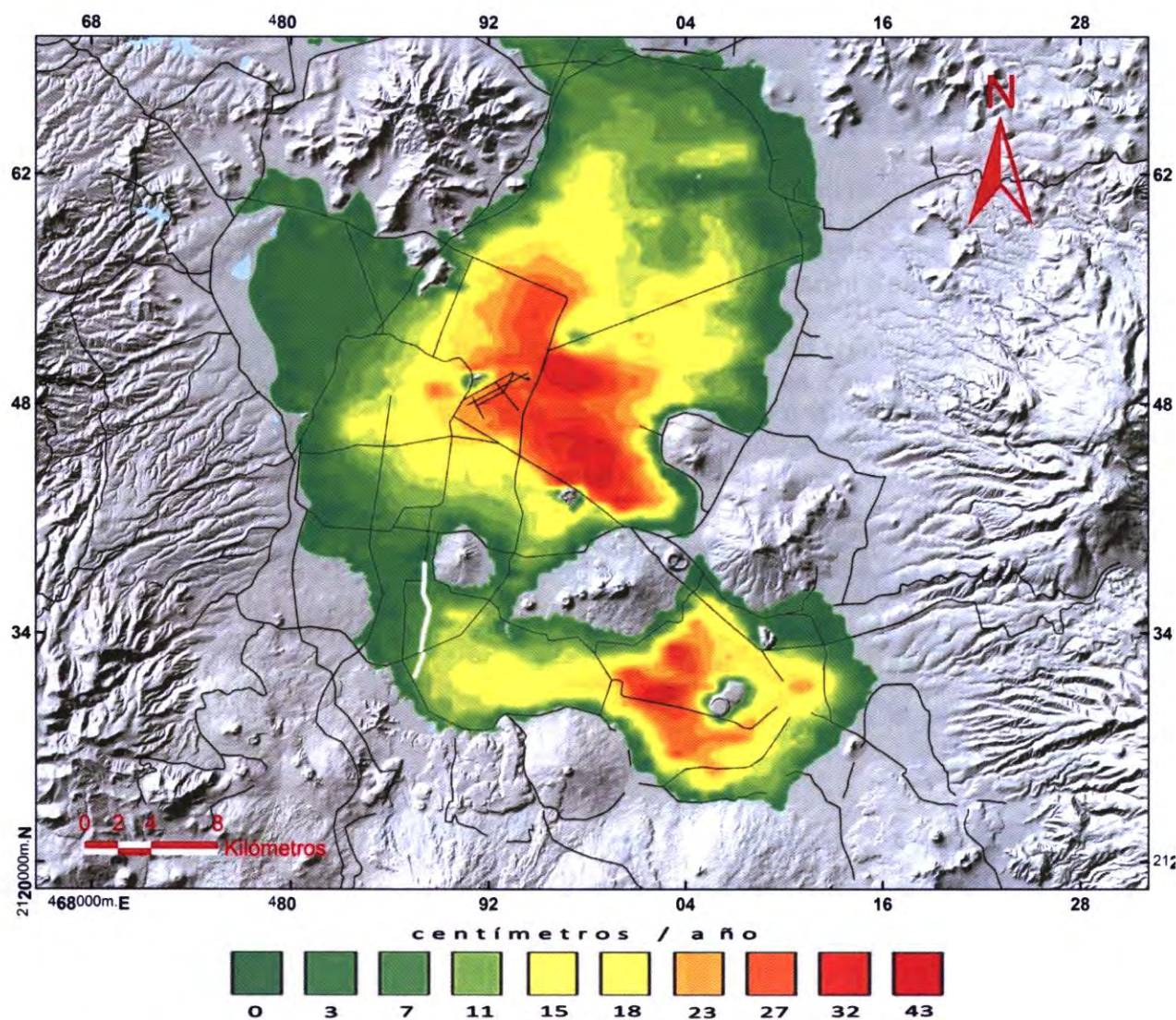


Fig. 20. Distribución espacial de las velocidades de hundimiento (1999 – 2008).

El trazo del proyecto en estudio se encuentra en una zona de velocidad de hundimiento baja a media (3 a 11 cm/año). Esta condición es de poca relevancia para el METROBÚS ya que el trazo no se encuentra en una zona de transición abrupta y los asentamientos diferenciales asociados a los hundimientos regionales se distribuyen a lo largo de distancias considerables.

#### 4. AGRIETAMIENTO

Cada vez con mayor frecuencia, se señala en alguna zona de la ciudad de México la aparición de grietas en el suelo que causan alarma entre la población y llegan a ocasionar daños de importancia a las construcciones.



El fenómeno del agrietamiento se puede manifestar a consecuencia de cualquier condición que genera esfuerzos de tensión importantes en el suelo (Auvinet, 2008). El fenómeno del agrietamiento del suelo en el valle de México tiene por tanto distintas causas, incluyendo la contracción de las arcillas lacustres por secado, la existencia de esfuerzos de tensión asociados al peso de las construcciones, el fracturamiento hidráulico en zonas de encharcamientos, los movimientos sísmicos, etc. Sin embargo, las grietas más importantes y destructivas son una consecuencia directa del hundimiento regional que se presenta en el valle de México por efecto del bombeo de agua en estratos profundos.

Al acentuarse el hundimiento, el agrietamiento del suelo, que antes solo ocurría en el vaso seco del Lago de Texcoco, ha tomado mucha importancia en la zona de transición, como consecuencia de los asentamientos diferenciales entre zonas de suelo blando y firme, con su secuela de daños a las construcciones e instalaciones urbanas.

En la Figura 21 se puede observar llanamente que tanto el trazo del METROBÚS como el área de influencia del proyecto, se encuentran a más de cinco kilómetros de la zona donde ocurre con más intensidad el fenómeno del agrietamiento (periferia de la Sierra de Santa Catarina). Cabe subrayar que la periferia del Cerro de la Estrella no es una zona de intenso agrietamiento, debido a las pendientes suaves de las laderas de este Cerro.

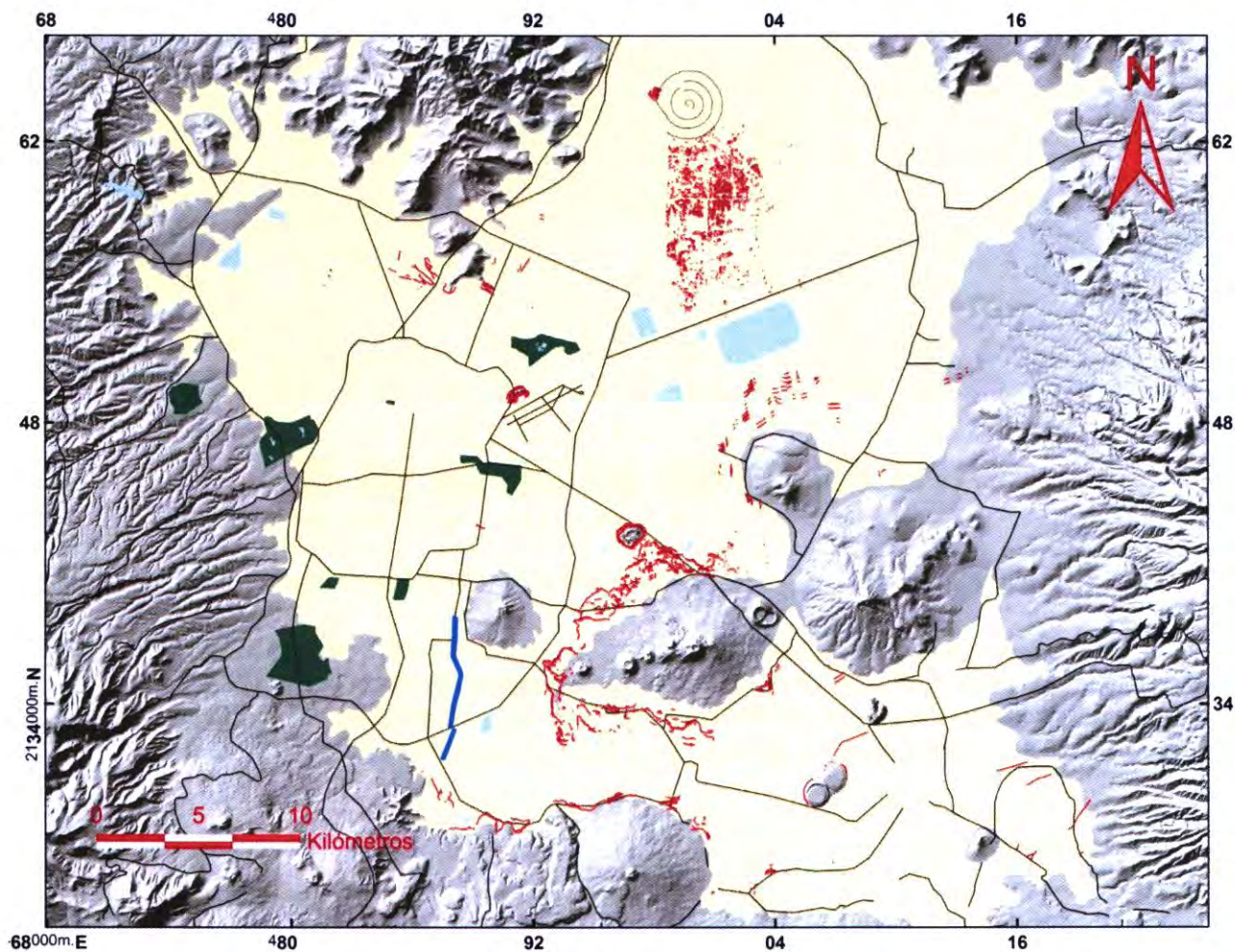


Fig. 21. Trazo del proyecto del METROBÚS bajo el contexto del fenómeno del agrietamiento.



## CONCLUSIONES

La Dirección General del METROBÚS ha solicitado al Laboratorio de Geoinformática de la Coordinación de Geotecnia del Instituto de Ingeniería de la UNAM (II-UNAM) su asesoría para la caracterización geotécnica del subsuelo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS.

Se ha realizado una evaluación de cada una de las capas temáticas que conforman el marco físico-geográfico, histórico y social del Valle de México que resguarda el Grupo del Laboratorio de Geoinformática del II-UNAM, así como de la información existente acerca del hundimiento, agrietamiento y anomalías geotécnicas.

Los documentos antiguos como mapas, litografías y cartográficos consultados revelaron pocas modificaciones antropogénicas al entorno físico geográficos del territorio donde se desenvuelve el trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS y; en consecuencia, la problemática que plantean los riesgos geotécnicos no es trascendental para la estructura vial del proyecto. En esta etapa del proyecto, se puede concluir específicamente lo siguiente:

- El trazo de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS cruza depósitos de suelos lacustres (Zona III) y, en menor proporción, materiales aluvio – lacustres (Zona II). Estas condiciones geotécnicas son típicas de las prevalecientes en el ex lago de la ciudad de México donde se encuentra desplantada gran parte de la Capital.
- El trazo se desarrollará en un área prácticamente plana, sin accidentes topográficos de importancia.
- Se encontraron algunas anomalías geotécnicas a lo largo del trazo (cruce con antiguos canales, calzadas y ríos) que podrán tomarse en cuenta en el diseño de la obra.
- La compresibilidad y la baja resistencia del suelo lacustre no constituyen una limitante para este tipo de proyecto debido a la escasa magnitud de las cargas transmitidas por la cimentación de la vía al suelo.
- El trazo cruza una zona donde el hundimiento regional que afecta toda la zona lacustre es de intensidad baja a media. Los asentamientos diferenciales inducidos por este hundimiento no afectarán el proyecto puesto que se desarrollarán en distancias considerables.
- El proyecto no se encuentra en una zona de transición abrupta entre suelos firmes y blandos donde pueda presentarse agrietamiento del suelo. Las zonas de mayor intensidad de agrietamiento (Periferia de la Sierra de Santa Catarina) se encuentran a más de cinco kilómetros de distancia. La zona periférica al Cerro de la Estrella no es sensible al agrietamiento debido a las laderas suaves que caracterizan este cerro y a su historia geológica.

En resumen, no se han detectado obstáculos de carácter geotécnico al desarrollo del proyecto de la ampliación de la Línea 5 – Sur del METROBÚS.



## REFERENCIAS

Auvinet, G., Méndez, E. and Juárez, M., (2017). "El subsuelo de la Ciudad de México/The Subsoil of Mexico City", Vol. 3 de la Tercera edición del libro de Marsal y Mazari, UNAM, Mexico, ISBN 978-607-02-8198-3.

Auvinet, (2002). "Uncertainty in Geotechnical Engineering", XVIth Nabor Carrillo Lecture, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Mexico.

Gobierno de la Ciudad de México, (2017). Normas Técnicas complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones. Gaceta de la CDMX

Juárez, M., (2001). "Aplicación de la geoestadística a la descripción del subsuelo del Valle de México", Tesis de Maestría, ESIA, IPN., México, D.F.

Juárez M., (2015). "Análisis geoestadístico del subsuelo de la zona lacustre del Valle de México", Tesis de Doctorado, DEPI, UNAM, México.

Krige, D. G., (1962). "Statistical application in mine valuation", J. Institute Mine Survey, South Africa.

Matheron, G., (1965). "Les variables généralisées et leur estimation", Masson et Cie, France.

Mooser, F., Montiel, A. y Zuñiga, A., (1996). "Nuevo mapa geológico de las Cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos", Comisión Federal de Electricidad, Ciudad de México, México.

Mooser, F., (2018). "Geología del Valle de México y otras regiones del país", Colegio de Ingenieros Civiles de México, Volumen 1, Ciudad de México, México.