



Delimitación neuronal de zonas geológicas usando ruido sísmico: Suelos de Transición en la línea 12 del Metro

Neural delineation of geological zones using seismic noise: transition soils in the metropolitan subway, Line 12

Felicita Marlene LIMAYMANTA¹, Silvia GARCÍA² y Luis F. PLIEGO³

¹Estudiante de Posgrado, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México

²Investigador, Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de México

³Gerente, Ingeniería Experimental S.A de C.V

RESUMEN: El tramo elevado de la Línea 12 del Sistema de Transporte Colectivo Metro atraviesa Zonas de Transición al sur de la ciudad de México extremadamente complicadas con abruptos cambios de propiedades de suelos lacustres a los de materiales tipo roca. El reconocimiento pertinente de las fronteras entre estas sub-zonas impacta profundamente en la selección del tipo de cimentación y del procedimiento constructivo. Establecida esta necesidad práctica se realizó una campaña de exploración (principalmente medición de ruido sísmico) para obtener más información sobre los suelos y sus propiedades. En este trabajo se propone una red neuronal para sub-zonificar la Transición a partir de los valores de periodos fundamentales de los depósitos de suelo. La capa de entrada de la red está conformada por los siguientes vectores: coordenadas geográficas, periodo fundamental, profundidad de los depósitos lacustres, resistencia a la penetración del cono y contenido de humedad. La salida es la categorización de un punto en la superficie como miembro de una *clase* o sub-zona. Se muestran resultados exitosos en clasificación puntual (pozo) que permitieron desarrollar una detallada sub-zonación de la Transición. Se muestra cómo este planteamiento puede ser aplicado a otras zonas complejas de los suelos del valle de México.

ABSTRACT: The elevated section of the metropolitan subway, Line 12, goes through the Transition Zone in Mexico City, extremely complex stratigraphies with abrupt properties changes between lacustrine soils and rock-like materials. Proper recognizing of boundaries between these materials (sub-areas) severely impacts on the selected foundation and constructive procedure. Based on this practical requirement an exploration campaign was executed (seismic noise measurements) to obtain useful information about soils and their properties. In this paper a neural network to delimit the sub-zones in the Transition area, based on the natural periods of soil deposits, is proposed. The input layer of the neural network contains the following vectors: geographical coordinates, natural period, soft deposits depth, cone penetration resistance and moisture content. The output layer is a classifier node for categorizing a geographical situation as a member of a *class* or sub-zone. Successful results are revealed for punctual classification and this remarkable neural capability is used to construct the detailed sub-zonation of the Transition. It is shown how this procedure can be applied in similar complex situations in the valley.

1 INTRODUCCIÓN

Los medios de transporte en una metrópoli de las dimensiones sociales y económicas del Distrito Federal deben ser públicos, seguros, rápidos y modernos. La proyección y construcción de la Línea 12 del sistema de transporte colectivo Metro responde a esta necesidad. Este mega proyecto marcó retos para la ingeniería Mexicana, entre las más cuestionadas la ingeniería geotécnica. La ruta que recorrerá la Línea está compuesta por tres tipos de obras civiles: Túnel profundo, Cajón subterráneo, y Tramo elevado/cajón superficial. En este trabajo de investigación se trata lo concerniente al Tramo elevado, compuesto por cinco subtramos y 4 estaciones. En su recorrido el Tramo elevado pasa por zonas

geotécnicas distintas, siendo la mayor preocupación de diseño aquellos subtramos que se desplantan sobre suelos con propiedades desfavorables.

La selección de los tipos de cimentación y los procedimientos constructivos para esta obra se basan en una exhaustiva evaluación de la estratigrafía, de las condiciones de los materiales y de la interacción suelo-estructura. Entre las soluciones estudiadas destacan un cajón de cimentación semicompensado con pilotes de fricción para controlar hundimientos, zapatas octogonales con pilas desplantadas y empotradas en roca sana y zapatas *convencionales*. Para definir cabalmente las soluciones más ventajosas es fundamental el

conocimiento detallado de la llamada del Tramo de la Línea.

Para este efecto se desarrollaron exploraciones que auxiliaran en el señalamiento de los límites entre sub-zonas (depósitos lacustres, materiales tipo roca, y composición errática). Una de las campañas más completas y mejor ejecutadas fue la de medición de ruido sísmico ambiental para determinar periodos dominantes del suelo empleando la técnica de Nakamura (Lermo et. al, 1996). Unificar esta información para definir los materiales sobre los que se desplanta este Tramo de la Línea usando herramientas de interpolación/aproximación tradicionales es muy complicado por el número de sondeos y la cantidad de parámetros adheridos a cada sondeo.

Conscientes de la compleja problemática se desarrolló un modelo neuronal que, con base en las mediciones de ruido sísmico y los sondeos de exploración geotécnica básicos, clasifica puntos en la superficie dependiendo de sus condiciones en subsuelo y respuesta sísmica. Con esta discretización cognitiva se delimitan fronteras entre subzonas y se construyen mapas.

En este artículo se presenta de manera resumida los criterios en el desarrollo de la red, la aplicación de las estimaciones neuronales en la elaboración de mapas y su aplicación en la selección de las cimentaciones y sus procesos constructivos.

2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA EN ESTUDIO: TRAMO ELEVADO DE LA LÍNEA 12 DEL METRO

El Tramo elevado se extiende en la zona sur-oriente de la ciudad de México y atraviesa las delegaciones de Iztapalapa y Tláhuac, demarcaciones que en algún momento formaron las riberas del Lago Xochimilco. El nivel de terreno de este Tramo se encuentra aproximadamente a 2238m.s.n.m y su travesía está afectada particularmente por la presencia de la sierra Santa Catarina, elemento que determina la existencia de las transiciones de suelo.

El Tramo elevado está conformado por cinco subtramos: Zapotitlán-Nopalera, Nopalera-Los olivos, Los Olivos-San Lorenzo Tezenco y San Lorenzo Tezonco-Periférico Oriente y seis estaciones: Calle 11, Periférico Oriente, San Lorenzo, Los Olivos, Nopalera y Zapotitlán. En la figura 1 se muestra la posición del Tramo en la zona, sus subtramos y estaciones.

Si hablamos sobre la geología del lugar, en términos generales, esta zona de la ciudad de México está constituida por depósitos lacustres del cuaternario de acuerdo con Mooseret. al (1996). En la figura 2 se aprecian las especiales condiciones geológicas que la presencia de la sierra Santa Catarina le imprimen a la

región y deben ser consideradas en cualquier desarrollo u obra civil. Estas características dirigen en gran medida el escenario geotécnico (depósitos con estratigrafías muy erráticas y atípicas de la Zona de Lago del valle de México). Por restricciones de espacio no se detallan en este documento las situaciones particulares a lo largo del Tramo pero en términos generales podemos decir que entre los materiales identificados se encuentran potentes espesores de arcilla lacustre, materiales aluviales, diversas condiciones de estratos arenosos/gravosos y presencia de materiales duros tipo roca. Una de las situaciones más interesantes y desafiantes es la secuencia de los depósitos lacustres que se ve interrumpida por formaciones basálticas en transición abrupta sin patrón identificable aún sobre puntos XY muy cercanos (sobre la Línea).

Para proponer una secuencia estratigráfica a lo largo del trazo de la Línea en esta zona se llevaron a cabo campañas de exploración geotécnica con la ejecución de 44 sondeos mixtos, 28 sondeos de penetración de cono y la instalación de 20 piezómetros. Esta información se interpretó a través de criterios de expertos y metodologías de interpolación y diagramas de las configuraciones propuestas se presentan en las figuras 3 a la 7 (los cinco subtramos mencionados anteriormente).

Esta disposición es tomada como referencia geotécnica pero dentro de un modelo neuronal su inclusión es "flexible" y la propia red se encarga de evaluar, comparar y desprestigiar incongruencias que rebasen criterios pre-establecidos entre formaciones, respuesta sísmica (como se explicará más adelante) y situación XY.

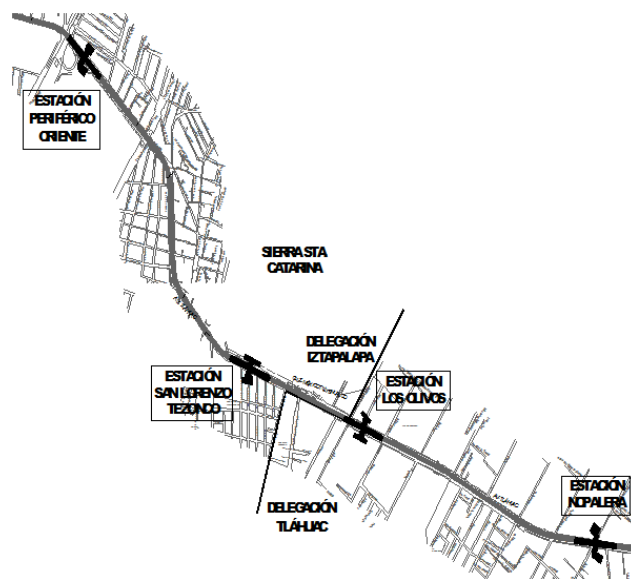


Figura 1. Ubicación del tramo elevado de la Línea 12.

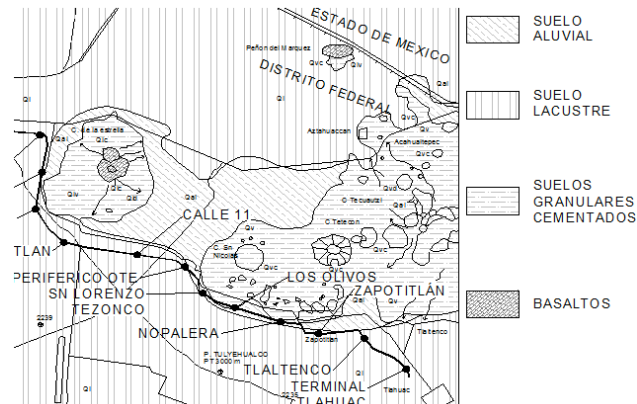


Figura 2. Mapa geológico del sur de la ciudad de México, Mooser et. al (1996)

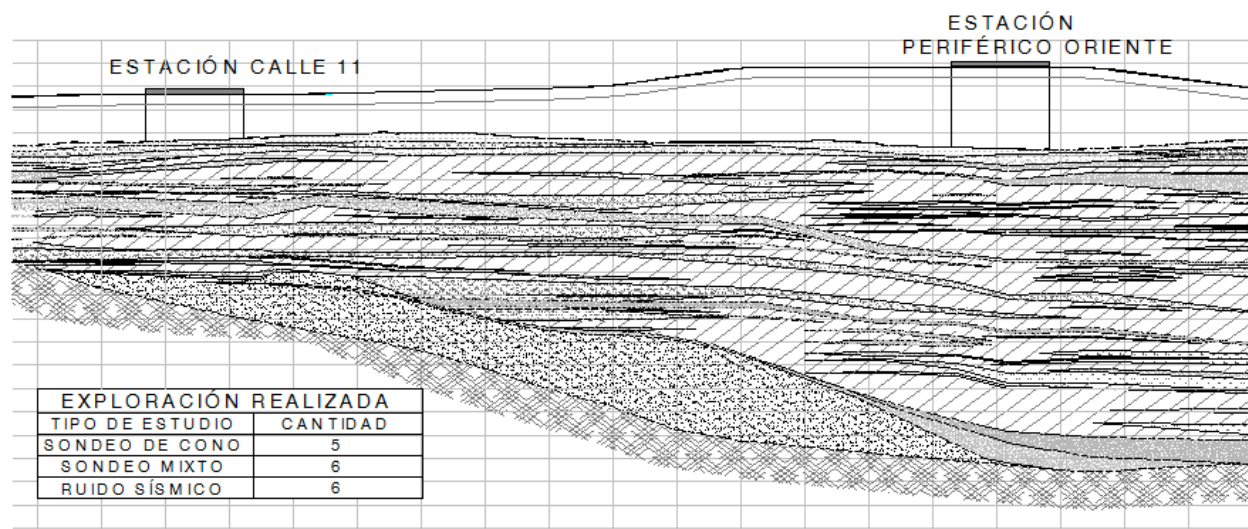


Figura 3. Estratigrafía entre la estación Calle 11 y Periférico Oriente

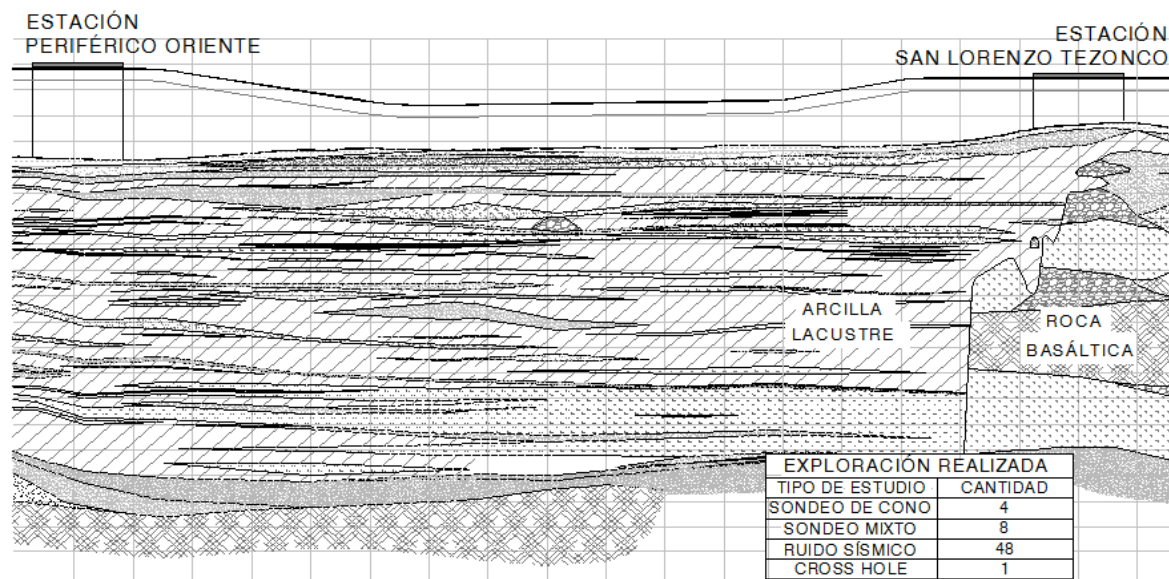


Figura 4. Estratigrafía entre la estación Periférico oriente y San Lorenzo Tezonco. En esta zona se encuentra parte del afloramiento de la roca

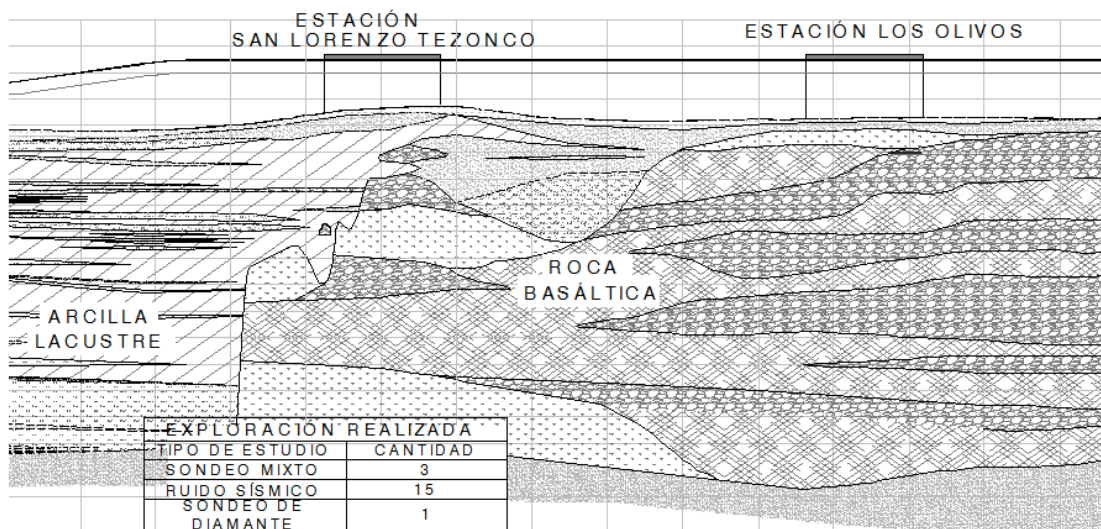


Figura 5. Estratigrafía entre la estación San Lorenzo y Los Olivos, en donde se encuentra el afloramiento de roca.

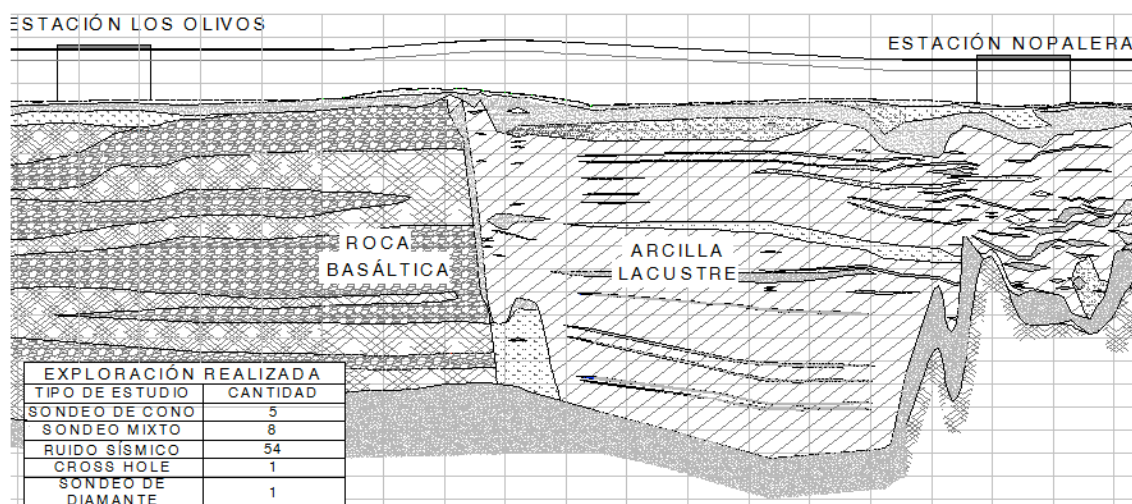


Figura 6. Estratigrafía entre la estación Los Olivos y Nopalera. El afloramiento de la roca se encuentra en la mitad de este tramo

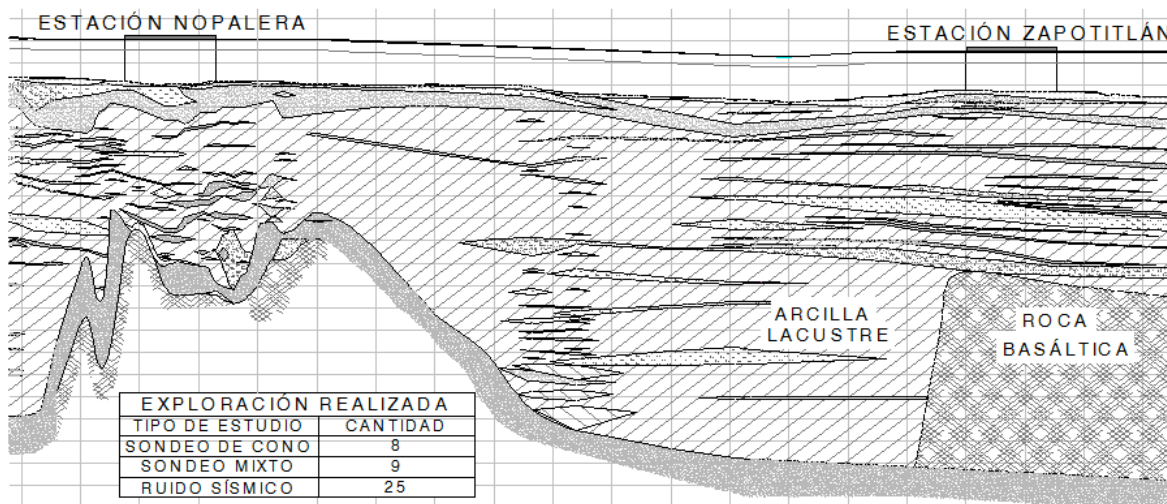


Figura 7. Estratigrafía entre la estación Nopalera y la estación Zapotit

2.1 Zonificación Oficial del Tramo elevado

De acuerdo con la zonificación geotécnica de las NTC del RCDF-2004, el tramo elevado se construiría en la zona III y en las inmediaciones de la frontera entre esta zona y la zona II, tal como lo muestra la figura 8.

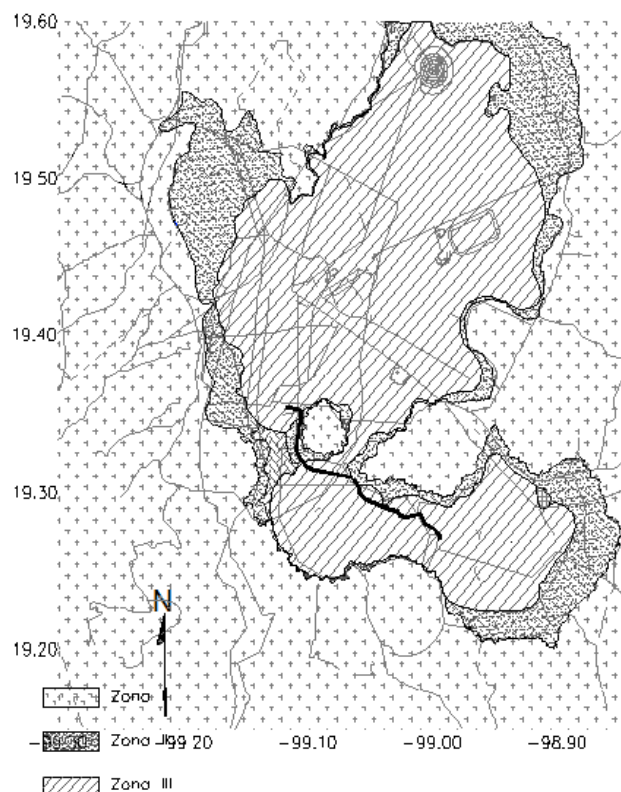


Figura 8. Ubicación del tramo elevado en el mapa de zonificación del RCDF-2004, NTC de Cimentaciones. Con línea gruesa se presenta el tramo elevado de la Línea 12 del Metro.

3 CLASIFICACIÓN DE SUELOS EN EL TRAMO ELEVADO

La recomendación del código resulta demasiado general (incluso peligrosa) y de acuerdo con los resultados de las inspecciones en campo se decidió sobre una exploración más específica del Tramo elevado. Como primer punto se concluyó que las regiones pertenecientes a la Zona de Lago son atípicas y que las fronteras entre ésta y la Transición no coinciden con lo señalado en el Reglamento. Entonces la delimitación precisa entre las Zonas II y III, como las describe el RCDF, dejó de ser la tarea de regionalización y se prefirió un estudio donde las particulares situaciones dirigieran las conclusiones expertos para hallar patrones de continuidad (o discontinuidad) y generar mapas en superficie de clases/respuestas (con base en estratigrafías

detalladas que no se sujetan a las estructuras de código).

Bajo el juicio de los expertos e interpretaciones se concluyeron sobre clases de arreglos análogos al típico de la Zona I. Las propiedades de estas clases se resumen en las tablas 1 y 2.

Prof. (m)	Descripción	SUCS	W	e	γ	c	ϕ	
De	a		%		t/m ³	kg/cm ²	(°)	
0	1.3	Relleno	-	22	0.83	1.76	0.4	25
.3	3.4	Arena	SC	44	1.91	1.31	0.22	28

Tabla 1. Zona I

Prof.(m)	Descripción SUCS		W	e	γ	c	ϕ	
De	a		%		t/m ³	kg/cm ²	(°)	
0	1.6	Relleno -	13.0	1.0	1.4	1.5	25	
1.6	2.9	Arenación ceniza	SC	23.7	1.2	1.5	0.1	50
2.9	5.2	Arcilla	CH	50.4	2.9	1.1	0.4	1
5.2	14.8	Arena con ceniza basáltica	SC	55.9	1.5	1.5	0.1	50
14.8	20.7	Limo arenoso	MH	55.5	1.6	1.5	0.3	1

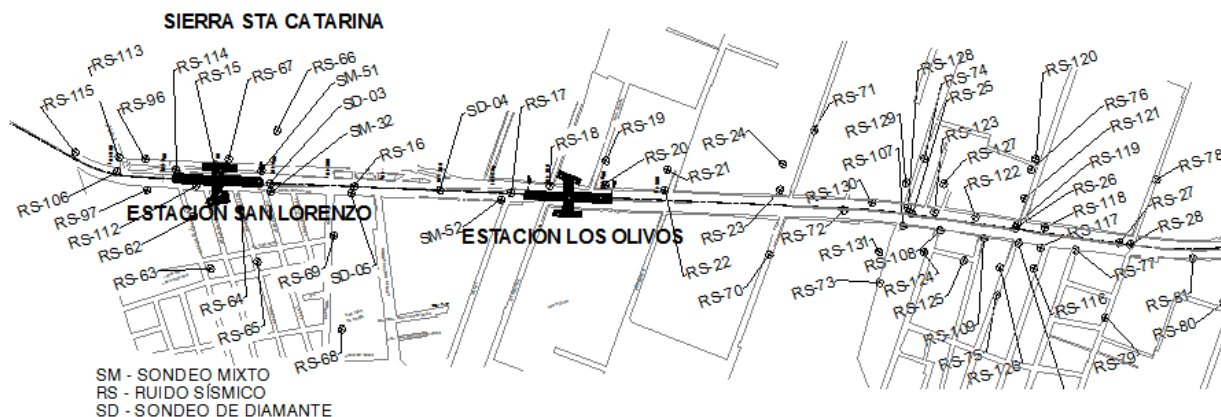
Tabla 2. Zona I'

En cuanto a los sitios previamente clasificados como Transición se propone seccionar el Tramo: i) segmento ubicado hacia el sur de la línea (llamada transición sur en este trabajo) entre los subtramos Nopalera-Los olivos y ii) segmento hacia el norte (llamada transición norte en este trabajo) entre los subtramos San Lorenzo-Periférico Oriente. En la figura 9 se muestran esquemáticamente los sitios de exploración (ensayos geotécnicos y medición de ruido sísmico) cuyos resultados fueron empleados para entrenar/probar/validar el modelo neuronal. Las mediciones de ruido sísmico se llevaron a cabo en 148 puntos a lo largo de los subtramos Nopalera-Los olivos, Los Olivos-San Lorenzo Tezonco y San Lorenzo Tezonco-Periférico Oriente. Para incluir bias de modelado en la red neuronal de este trabajo se estudiaron las recomendaciones de valores estándar del RCDF-2004 (tabla 3) y se trataron de seguir sus lineamientos.

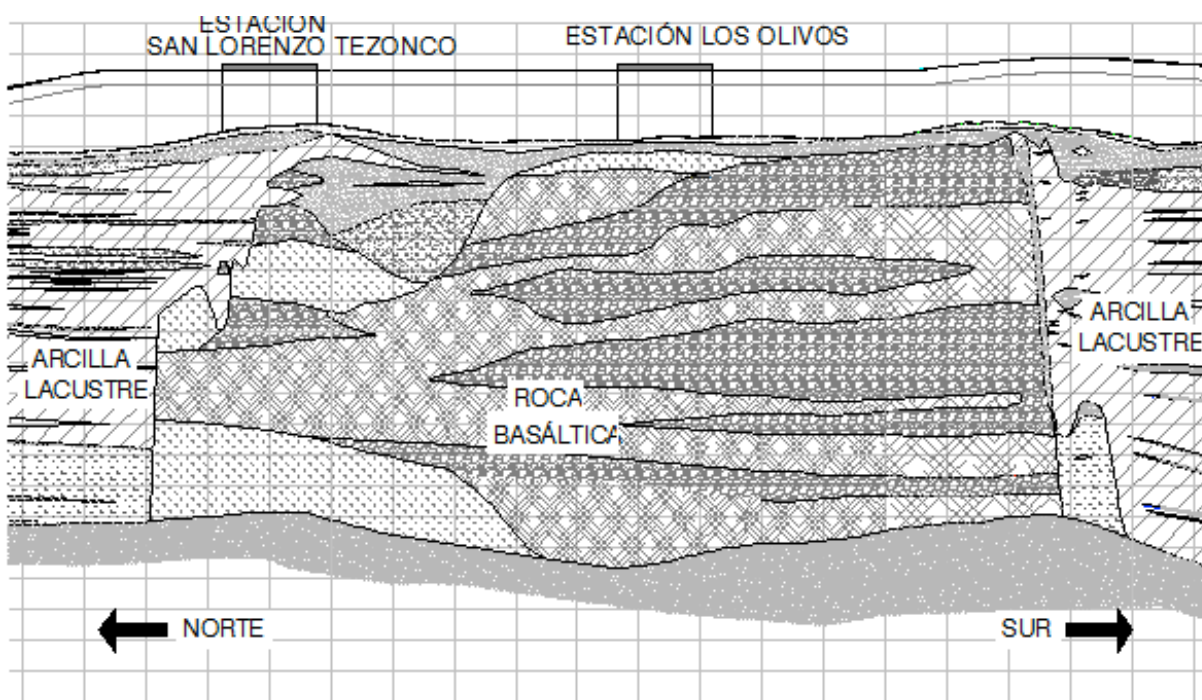
Tabla 3. Propuesta de clasificación de suelos para la línea 12 del Metro

CLASE	T_o^*	Características
1	$T_o < 0.5$	Tipo I, RCDF-2004
2	$0.5 < T_o < 1.0$	Tipo II, RCDF-2004
3	$T_o > 1.0$	Tipo III, RCDF-2004

(*) Periodo dominante del suelo



(a)



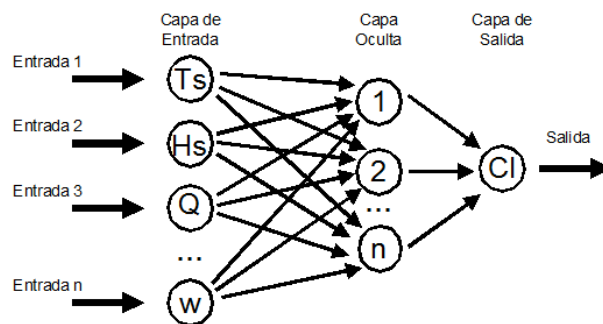
(b)

Figura 9. Zonas de transición. a) Ubicación en planta, b) ubicación en perfil.

3.1 Regionalización en zonas de transición abrupta

El trabajo de reconocimiento de patrones se sustenta también en los valores de espesor de suelo lacustre (determinación preliminar a partir de los estudios in situ), la resistencia de los materiales y una propiedad índice de los suelos.

La red entrenada es del tipo perceptron multicapa y el algoritmo de aprendizaje Quick Propagation (García S. 2009). La topología de la red entrenada y catalogada como "la más eficiente" se presenta en la Figura 10.



*CI - clase

Figura 10. Topología de la Red Neuronal Artificial

Como se observa en la Figura 10 la estructura de entrada de la red contiene los vectores T_o (periodo recomendado en las NTC del RCDF) y T_n (valor obtenido de las campañas de microtemores), H_c (espesor de arcillas lacustres, preliminar), Q_c (resistencia a la penetración del cono) y $W\%$ (contenido de humedad) adheridos a una condición geográfica/geométrica X,Y,L (latitud y longitud/cadenamiento) y un nodo de profundidad Z (en m) que empaqueta la información de exploración para presentarla como individuo. La salida o tarea de la red es la decisión de clase, es decir, una vez leída la información empaquetada otorga un número de salida (se acota para prevenir de la generación de M clases donde M sea cercano o igual al N número de patrones de entrenamiento) que significa la pertenencia de ese individuo a una categoría detectada común entre más de dos individuos en el archivo de entrenamiento.

Por limitaciones de espacio se presentan aquí sólo los resultados obtenidos para uno de los tramos más conflictivos: los cadenamientos entre la estación San Lorenzo y la estación Los Olivos.

Como se observa en la Figura 11 la RN ha definido sólo tres clases en las que puede empaquetar la información sísmica y geotécnica.

Es importante señalar que los paquetes armados con X,Y,Z /cadenamiento aseguran que las condiciones debajo de las zonas/clases neuronales no tengan discontinuidades repentinas. Además de encontrarse elementos/individuos que se repitan en cadenamientos no consecutivos, la red está abierta a nombrarlos miembros de clases puntuales. En el mapa de la Figura 11 se observa que en esta transición la RN encuentra tres zonas con propiedades claramente identificables.

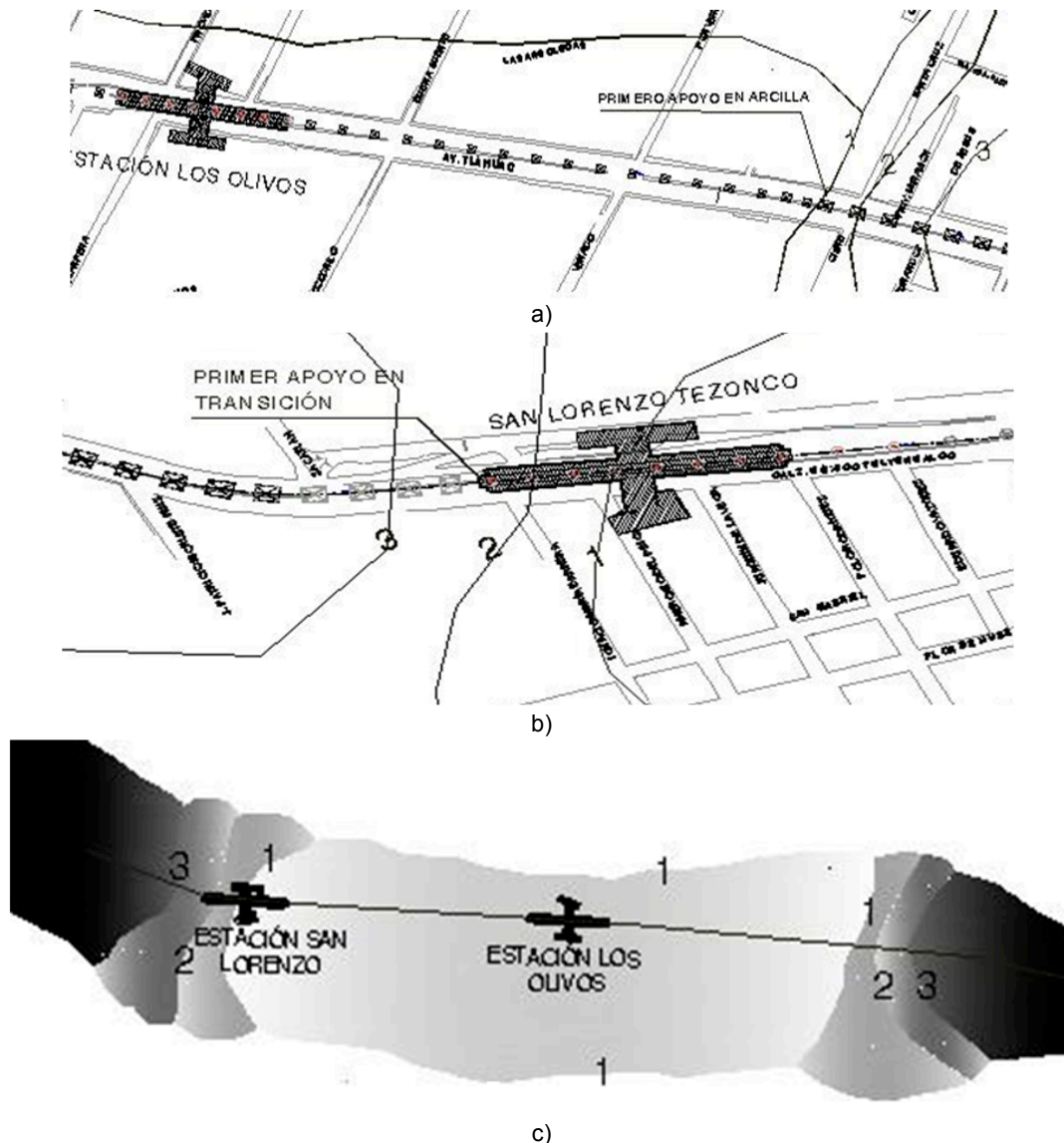


Figura 11. Zonificación de la zona de transición. a) Transición sur b) transición norte c) Mapa de zonificación

La distribución en planta permite señalar aspectos clave en el desarrollo de las estaciones, por ejemplo la estación San Lorenzo se desplanta sobre dos sub-zonas y el trazo hacia la estación Los Olivos corre principalmente en una sola zona que se acota como 1 y tiene características constantes más cercanas a las que conocemos como típicas del Lago (vea tabla 4). Se observa además que en la transición sur la frontera es bastante cerrada, con lo que se comprueba la presencia de un corte vertical en la roca, tal como lo muestra la figura 9. En cambio en la transición norte la frontera entre la roca y la zona lacustre tiene mayor longitud y a profundidad los cambios entre los depósitos suaves a más firmes es gradual de acuerdo con la deposición y formación geológica.

Las fronteras en la zona llamada 3 coinciden con las determinadas a partir de los resultados de los sondeos geotécnicos como el límite de los generales entre Lago y Transición.

Tabla 4. Características de las zonas

Clase	To	Descripción
I	$T_o < 0.5$	Roca basáltica gris oscuro con un RQD promedio igual a 80%
II	$0.5 < T_o < 1.0$	Suelos lacustres con espesores menores a 20.0 m y estratos superficiales limo arenosos de consistencia variable de blanda a firme. Número de golpes (Np) promedio igual a 15 y contenido de humedad (w%) promedio igual a 80%
III	$T_o > 1.0$	Suelos lacustres con espesores mayores a 20.0 m. Estratos arcillosos de compresibilidad alta y consistencia blanda con lentes de arena limosa y ceniza volcánica. NP promedio igual a 5 y w% promedio igual a 220%

4 CONCLUSIONES

Con los valores de periodo dominante del suelo de las campañas de microtemores, la información geotécnica y los juicios de los expertos se construyó una red neuronal artificial para mapear zonas de transición de acuerdo con esta descripción paramétrica. Se concluye que la RN traza con precisión la frontera entre los suelos lacustres y la zona de rocas y ofrece una mejor descripción sobre las situaciones donde los cambios de suelos blandos a firmes es abrupta/discontinuidad gradual.

Con el conocimiento cabal de las fronteras entre un tipo de suelo (o paquetes estratigráficos) y otro se puede decidir más eficazmente sobre los tipos de cimentaciones y sus procesos constructivos, haciendo de esta actividad ingenieril una más inteligente, económica y segura.

La importancia práctica del ruido sísmico queda evidenciada por su sencillez y utilidad en modelos numéricos como el presentado aquí. No sólo permite obtener patrones de respuesta útiles en ingeniería

sísmica sino que contribuye a la definición de estratigrafías, materiales y geometrías.

El diseño y construcción de la red neuronal es mucho más robusto y paradójicamente más sencillo que el estudio con métodos estadísticos en el cual se tiene que recurrir a procedimientos exhaustivos para generar resultados que carecen, en gran medida, de rigor científico.

REFERENCIAS

- García B. S. (2009). "Computo aproximado en la solución de problemas geosísmicos", Tesis para obtener el título de doctorado, Facultad de Ingeniería, *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Giraldo V., Alfaro A., Pujades L. G. y Canas J. A., 1999, "Estimación de efectos Locales con Movimientos Sísmicos y Microtemblores", *Monografías de Ingeniería Sísmica*.
- Lermo J. y Chávez-García F. (1993). "Site effect evaluation using spectral ratios with only one station", *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 83: 1574 – 1594.
- Lermo J. y Chávez-García F. (1994). "Are microtremors useful in site response evaluation?", *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.84: 1350-1364.
- Reglamento de construcción del distrito Federal (2004). "Normas Técnicas Complementarias para cimentación y sismos".