

Contribución al análisis de asentamientos regionales en Bogotá.

A contribution to the analysis of regional settlements in Bogotá

Jorge Alberto Rodríguez O.

Pontificia Universidad Javeriana - Bogotá

Resumen

En años recientes se han realizado determinaciones de la tasa de asentamiento regional en la Sabana de Bogotá que indican que se están presentando asentamientos a una tasa entre 1 y 7 cm/año dependiendo de la zona de la Sabana que se considere. En este artículo se presenta una evaluación de los asentamientos para el perfil de suelos hasta 250 m de profundidad en el sector del Aeropuerto El Dorado. Se evalúan los asentamientos por compresión secundaria teniendo en cuenta la variación en profundidad de la edad del depósito que alcanza 1.2M años en el espesor considerado y el efecto de éstos sobre la relación de sobreconsolidación (RSC). También se evalúan los asentamientos producidos por cambios regionales de nivel freático o por extracción de agua subterránea. Los valores de RSC calculados son consistentes con los medidos por lo que se concluye que la preconsolidación de las arcillas de la formación Sabana se debe fundamentalmente al efecto de compresión secundaria. Esto también valida los parámetros adoptados en los cálculos. Estos resultados se comparan con los datos medidos de asentamientos regionales y de RSC obtenidos por otros medios. Por otra parte, con base en estos modelos, las tasas de asentamientos que se están midiendo sólo se podrían explicar por efectos de variación de la presión de poros en el depósito, ya que los de compresión secundaria son muy pequeños comparados con los medidos.

Abstract

Recent studies have shown that there regional settlements are occurring in the Bogotá Sabana at rate in the range 1 to 7 cm/year in different areas. This paper presents an evaluation of settlements for the soil profile in the area close to the El Dorado International Airport. Secondary compression settlements are evaluated taking in to account the deposit age that varies with depth up to 1.2M years, and the effect of these on the overconsolidation ratio (OCR). Settlements produced by variations of pore water pressures, either due to phreatic level changes or water extraction are computed. OCR values computed are consistent with measured data indicating that the OCR in the Sabana Formation clays are due to secondary compression and the results provide indication that the parameters used in the model are correct. The results are compared with actual settlement measurements. It is concluded that the secondary compression settlements are not significant and all the changes that are occurring are due to changes in pore water pressures.

1 INTRODUCCION

Los depósitos sedimentarios de la cuenca de la Sabana de Bogotá, principalmente los lacustres de la formación Sabana, con espesor del orden de 100 a 300 m en diferentes zonas de la Sabana, vienen desarrollando asentamientos regionales que han producido efectos evidentes especialmente en la infraestructura vial en el occidente de la Sabana, pero que pueden estar

afectando o afectar en el futuro otros elementos en particular los sistemas de conducción de agua que son sensibles a las cotas y otros. Recientemente se le está dando importancia a la evaluación de estos efectos. Con el fin de cuantificar la magnitud de los asentamientos, la Dirección de Prevención y Atención de Emergencias del Distrito (DPAE) ha contratado dos estudios con el Instituto Cartográfico de Cataluña, para medir el desplazamiento vertical del terreno a partir del análisis de imágenes satelitales, mediante la

técnica de interferometría diferencial DInSAR (Blanco y Barreto, 20010). El IGAC (Martinez et al, 2008) también ha desarrollado trabajos de monitoreo de la subsidencia que muestran tasas de asentamiento típicas entre 10 y 20 mm/año entre 2003 y 2007 con estaciones que localmente han alcanzado hasta 100 mm/año en este periodo.

El trabajo de Hernández, y Quevedo, (2003), reportado en el libro Entorno natural de 17 ciudades de Colombia (2007), realizado con base en líneas de nivelación en toda el área de la ciudad a partir de datos geodésicos del IGAC, muestra claros valores de asentamientos regionales en el tiempo considerado de hasta 0.7 m, siendo mayores hacia el occidente de la Sabana hacia el río Bogotá, donde los espesores de suelos lacustres son mayores.

Se presume que estos se deben a dos procesos principalmente. Por una parte el nivel freático en general ha venido descendiendo con el tiempo debido a la evapotranspiración natural, extracción de agua subterránea y a los cambios del uso del suelo que han cambiado los regímenes de infiltración de agua lluvia en el terreno. Según Ávila, (1998) las medidas piezométricas de pozos en Bogotá realizadas por Ingeominas, hacen ver que la presión del agua en el subsuelo es inferior que la presión hidrostática, lo cual tendría una influencia muy importante sobre los asentamientos y la generación de grietas en la parte superior del depósito lacustre y que los descensos potenciométricos del agua subterránea a tasas de 3 y 5 m/año se traduciría en una causa muy importante en la generación de grietas en el subsuelo (Loboguerrero, 1995). Estos cambios producen aumentos en los esfuerzos efectivos en toda la columna de suelo y por lo tanto asentamientos por consolidación. Por otra parte se producen asentamientos por compresión o consolidación secundaria lo cual es un proceso natural inherente a los suelos finos el cual es un flujo plástico viscoso que se produce a esfuerzo constante por reorganización de los minerales arcillosos con el tiempo. Este efecto se puede cuantificar en primera instancia mediante el índice de compresión secundaria, y aunque en principio continúa ocurriendo de manera indefinida, su tasa va decreciendo desde el momento en que se formó el depósito y depende de la plasticidad del suelo.

El presente artículo pretende realizar evaluaciones de asentamientos considerando las dos causas planteadas con el fin de evaluar su contribución relativa y poder hacer predicciones con respecto a posible evolución futura de estos asentamientos para evaluación de proyectos de

infraestructura en Bogotá. Para esto se considera un perfil de suelos en el sector del Aeropuerto de Bogotá donde existe información del perfil de suelos hasta 250 m de profundidad obtenida dentro del estudio de Microzonificación sísmica de Bogotá (Ingeominas – Uniandes, 1997)

2 PERFIL DEL TERRENO EN EL SITIO DE ANÁLISIS

El sitio de análisis corresponde al sector del Aeropuerto El Dorado. En ese sector se cuenta con información de dos sondeos (1 y 51) realizados por el Ingeominas para el estudio de microzonificación sísmica de Bogotá en 1997 que alcanzaron 250 m de profundidad. De estos se tienen datos de caracterización, humedad natural y límites de consistencia como se muestra en la Figura 1. En esta figura se aprecia con claridad la diferencia de los suelos lacustres de los 100m superiores de la Formación Sabana, y de los suelos aluviales de la formación Subachoque en la parte inferior de la columna estratigráfica. A partir de estos se calcularon otros parámetros de caracterización tales como peso unitario, relación de vacíos e índices de compresión primaria y secundaria utilizando información de estudios de suelos realizados para la reconstrucción del Aeropuerto recopilados por Jeoprobe,(2008), correlaciones inicialmente reportadas por Moya y Rodriguez, (1987) y complementadas desde entonces con datos de un buen número de proyectos en la ciudad como se muestra en las Figuras 2 y 3.

Para la caracterización con el fin del cálculo de asentamientos se determinaron los perfiles de relación de vacíos e índices de compresión y recompresión como se muestra en la Figura 4.

3 EVALUACIÓN DE ASENTAMIENTOS POR COMPRESIÓN SECUNDARIA

Una de las causas de asentamientos de depósitos arcillosos a largo plazo es la compresión secundaria. En su forma más simple estos se pueden calcular a partir del índice de compresión secundaria, C_α , para un cierto rango de tiempo $[t_2:t_1]$ por medio de la expresión:

$$\Delta\rho = \frac{\Delta h}{1+e} C_\alpha \text{Log} \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (1)$$

Para esto es necesario determinar los valores de relación de vacíos (e) y C_α , para cada incremento de profundidad (Dh) para todo el perfil de suelos considerado. Además es necesario definir el rango

de tiempo. En este caso en primera instancia se quiere estimar el asentamiento total del depósito

desde su formación, y por otra parte este efecto en los últimos 10 años.

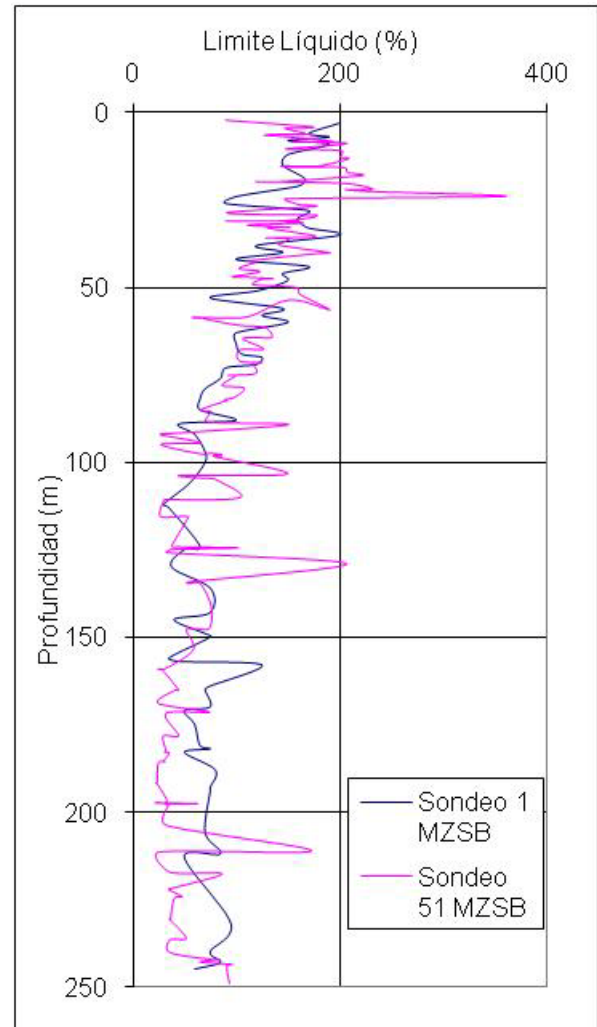
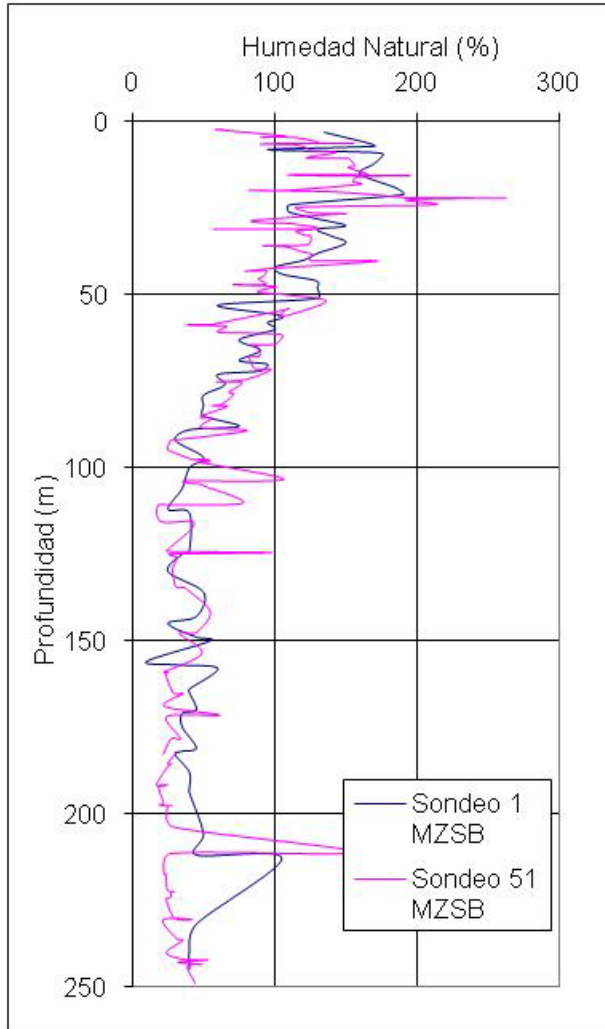


Figura 1 Datos del perfil de suelos en el sector del Aeropuerto El Dorado.

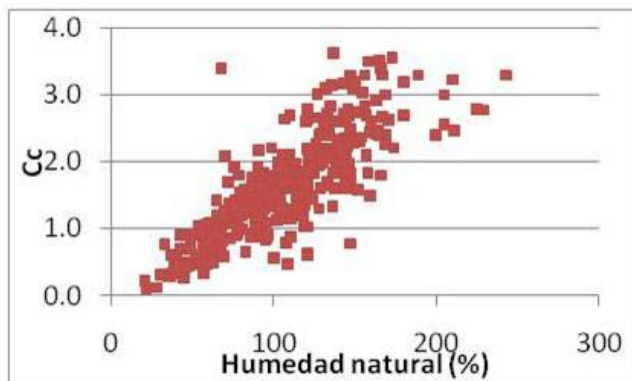


Figura 2 Índice de compresión primaria, C_c , en función de la humedad natural

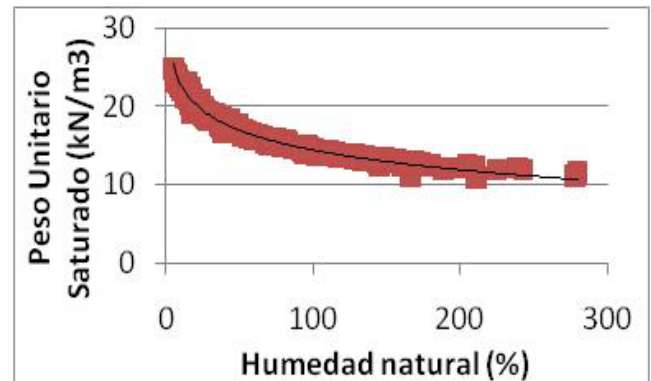


Figura 3 Peso unitario saturado en función de la humedad natural.

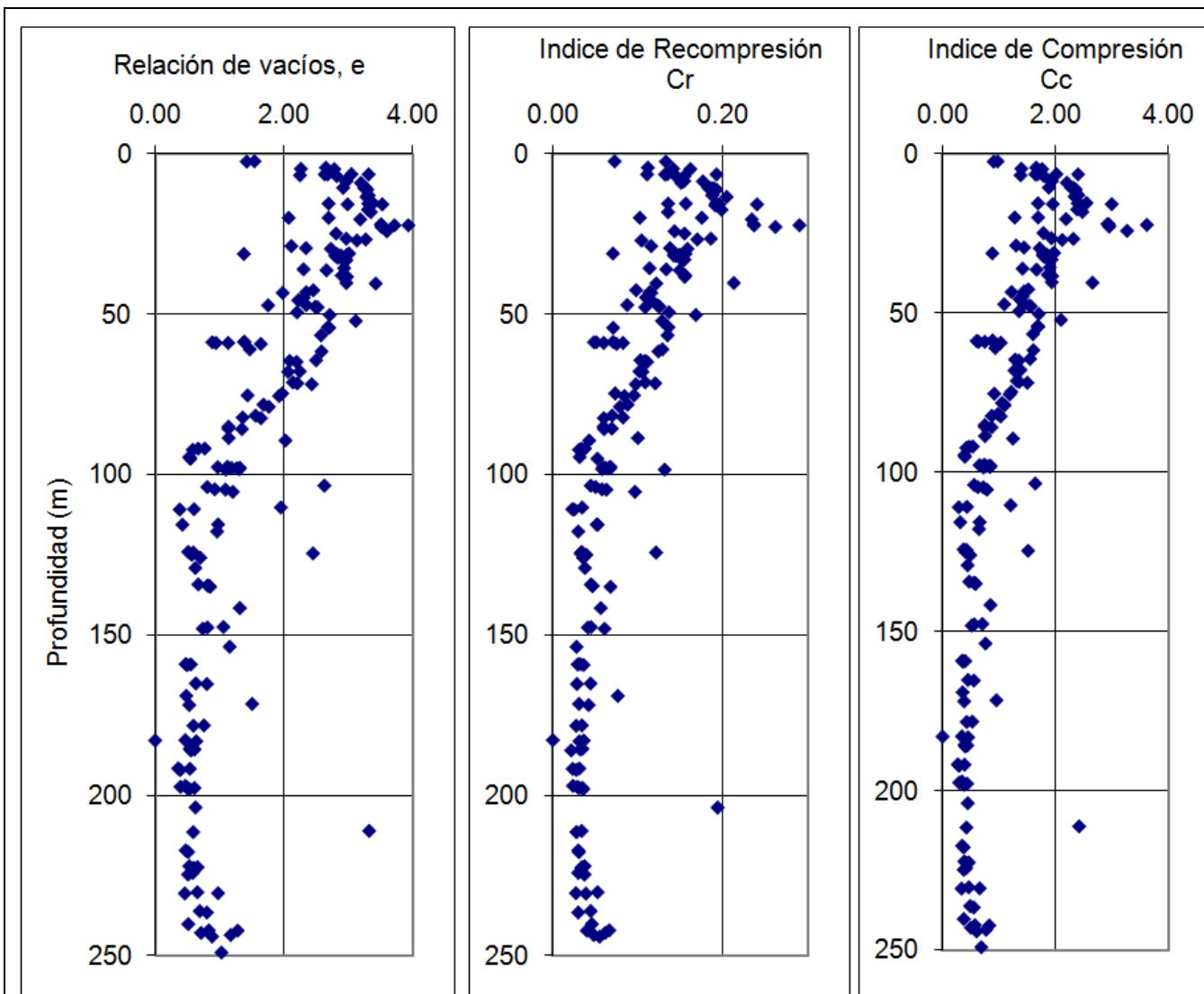


Figura 4 Perfil de propiedades estimadas

El valor de C_α se estimó con base en el índice de viscosidad I_v , definido como $I_v = C_\alpha / C_c$. Este parámetro está relacionado con la plasticidad del suelo de la forma como se indica en la figura 5 (Tomada de Cudmani, 2004). Para los suelos de Bogotá este parámetro se ha evaluado a partir de la resistencia movilizada en pruebas de carga estáticas y dinámicas de pilotes en las que la relación de tasas de carga es aproximadamente de 106 (Rodríguez et al, 2008). Debido al efecto viscoso la resistencia es mucho mayor a altas tasas de carga y esto se puede calcular con base en el índice de viscosidad. Conociendo los valores de resistencia es por lo tanto posible obtener el valor de I_v . Los valores obtenidos son consistentes con los de la Figura 5 para los suelos de la formación Sabana que tienen límite líquido en el rango de 100 a 200. Con base en esta relación se obtuvo el perfil de I_v para el depósito como se muestra en la Figura 6.

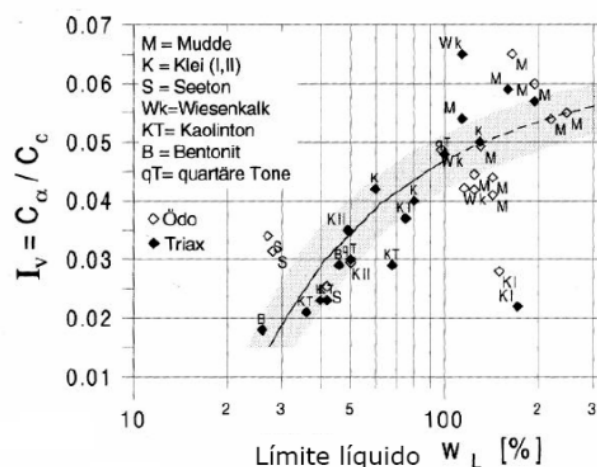


Figura 5 Valores del índice de viscosidad en arcillas naturales (Krieg, 2000, presentada por Cudmani, 2004)

El rango de tiempo a considerar en este caso está relacionado con la edad del depósito. Esta ha sido evaluada en estudios geoambientales de la

Sabana por medio de dataciones con carbono 14 y fisión de zirconio y por correlaciones palinológicas (Torres et al., 2005). La edad evaluada de los depósitos de la Sabana de Bogotá se muestra en la Figura 7, tomada de Torres et al (2005). Con base en estos datos la columna de suelos de 250 m considerada tiene una de hasta 1.225.500 años.

Con toda la información relacionada se pudo calcular el asentamientos por compresión secundaria desde su formación la cual corresponde a un total entre 11.6 y 18.4 m dependiendo del momento desde cuando se comience a contabilizar el tiempo de la compresión secundaria. Por otra parte si se calcula sólo el incremento de deformación correspondiente a los últimos 10 años, el valor que se obtiene es de menos de un milímetro, lo que indica que este efecto no parece estar afectando el

desarrollo de asentamientos regionales en la actualidad.

Esta información también permite calcular el cambio de relación de vacíos por creep lo cual a su vez produce un efecto de preconsolidación. Utilizando los índices de recompresión y compresión primaria y el cambio de relación de vacíos es posible evaluar la relación de sobreconsolidación que se produce por este efecto. Estos valores se presentan en la Figura 6. Se aprecia que estos valores son del orden de 1.8 en la formación Sabana, lo cual coincide muy bien con datos obtenidos de ensayos y con recientes resultados de sondeos con piezocono que se han realizado en estos suelos (Jeoprobe, 2010). El hecho de que estos resultados sean consistentes con mediciones realizadas independientemente evidencia una coherencia de los datos utilizados en los modelos y sus resultados.

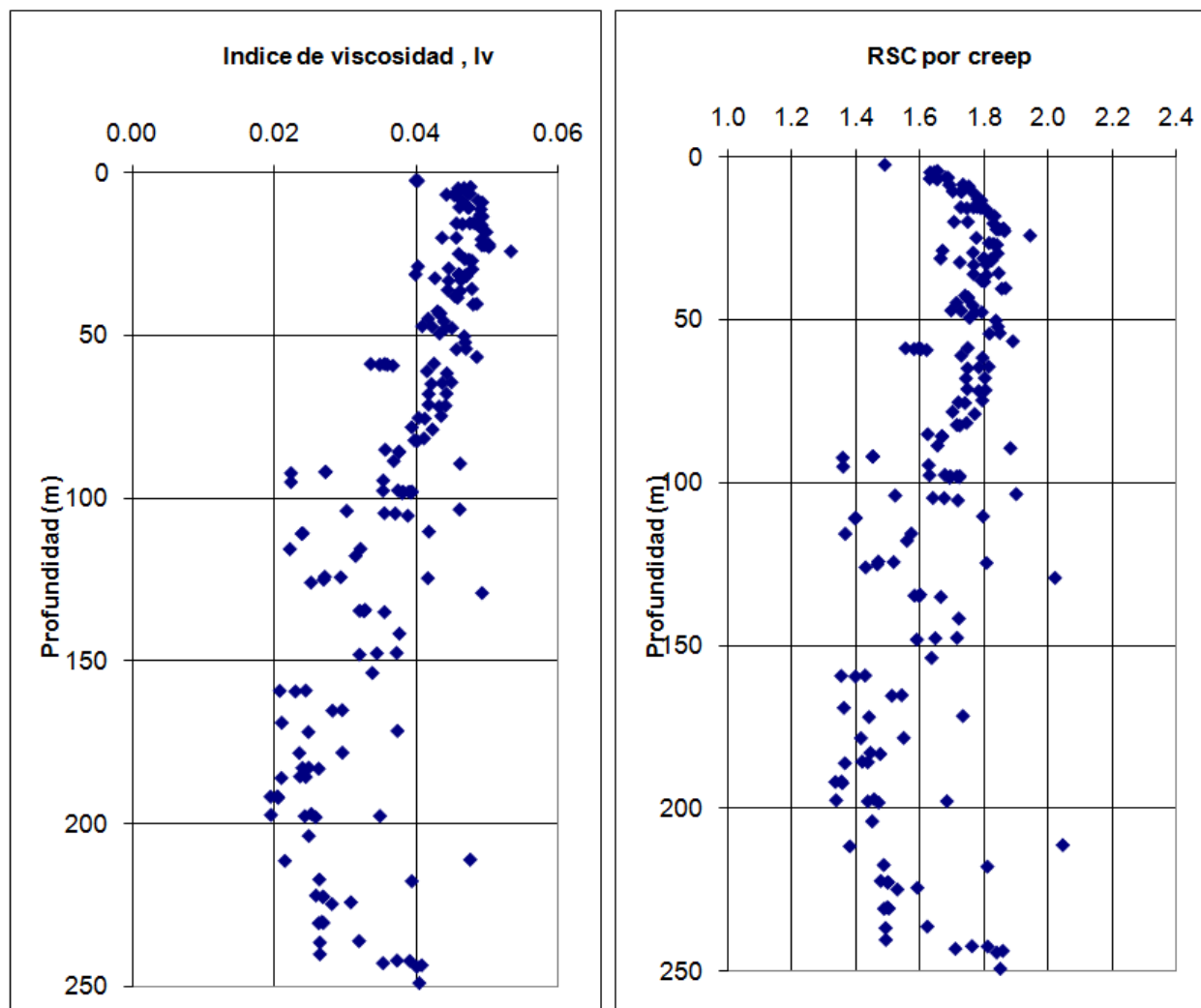


Figura 6 Perfiles de Índice de viscosidad y relación de sobreconsolidación por efecto de compresión secundaria.

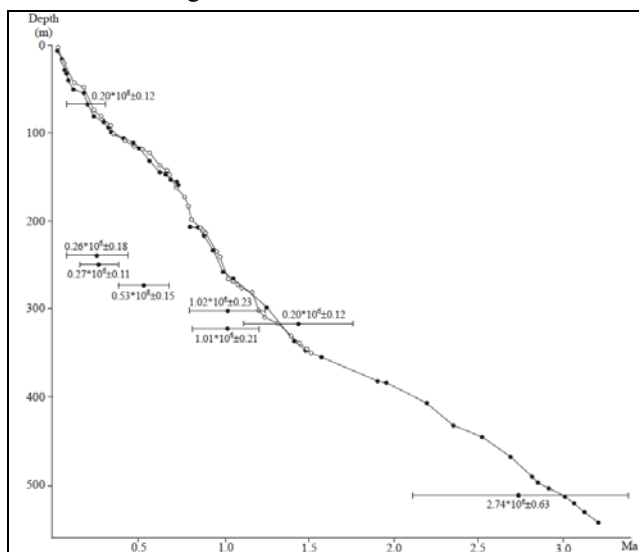


Figura 7 Edad de los depósitos de la Sabana de Bogotá (tomado de la Figura 3 de Torres et al. 2005)

4 EVALUACION DE ASENTAMIENTOS POR COMPRESION PRIMARIA

La otra causa probable de los asentamientos regionales es el cambio en los esfuerzos efectivos por cambios en la presión del agua en el depósito, particularmente por efecto de descenso del nivel freático debido a un balance negativo en la evapotranspiración y a la extracción de aguas subterráneas. Hay evidencias de que ambos procesos ocurren en la Sabana, no sólo por condiciones climáticas sino por cambios en el uso del suelo en la ciudad. Con respecto a esto, y dado que el efecto de la compresión secundaria parece ser despreciable, se deduce que la variación del nivel de agua es la causa principal de los asentamientos regionales.

Para la evaluación realizada en este caso se tienen los valores medidos de asentamientos como se muestra en la Figura 8 tomada del trabajo de Hernández, y Quevedo, (2003), reportado en el libro Entorno natural de 17 ciudades de Colombia (2007), realizado con base en líneas de nivelación en toda el área de la ciudad a partir de datos geodésicos del IGAC, muestra claros valores de asentamientos regionales del orden de 0.1m entre 2003 y 2007 en el sector de estudio. Los datos de la DPAE, (Blanco y Barreto, 2010), con base en mediciones de interferometría de radar que se muestran en la Figura 9 también muestran asentamientos del orden de 2.2 a 3.1 cm/año.

Con los datos del modelo de suelos que se ha formulado es posible calcular la respuesta del depósito a cambios en los valores de esfuerzo efectivo que se producirían debidos a cambios en la presión del agua. Estos cálculos se hicieron de

manera que se reprodujeran los asentamientos medidos con lo que se obtuvo que cambios de esfuerzo efectivo serían necesarios para que el cálculo correspondiera con los asentamientos observados. En la Figura 10 se presentan los resultados de estos análisis los cuales dependen del valor inicial del esfuerzo efectivo que en este caso depende del nivel freático. En el modelo se calculan los asentamientos cambiando el nivel freático (cambio en el esfuerzo efectivo en todo el perfil).

Los resultados de la Figura 10 muestran que se requieren cambios muy pequeños del esfuerzo efectivo (del orden de 0.05 a 2.5 kPa/año, o 5 a 25 cm de cambio efectivo del nivel piezométrico), para producir los asentamientos que se han registrado. También que el efecto del valor inicial del nivel freático es muy importante. Entre más superficial sea, menor el nivel de esfuerzos efectivos y mayor el efecto de cualquier cambio que se produzca.

En la Figura 11 se presenta la variación del asentamiento calculado con la profundidad para las condiciones consideradas de abatimiento del nivel freático. En esta figura se puede apreciar que el mayor efecto se produce en los suelos superficiales, y más del 90% corresponde al efecto en la formación Sabana.

En el caso que la reducción de la presión se dé en profundidad, por extracción de agua subterránea, las variaciones del nivel efectivo son mayores para producir el mismo efecto de asentamiento en superficie como se muestra en la Figura 12. En este caso se produce una reducción en el nivel piezométrico centrado a una profundidad de 150m, representativa del efecto de pozos que extraen agua en la formación Subachoque. En este caso se requiere abatimientos entre 4 y kPa/año para producir los efectos en superficie que han sido reportados.

Loboguerrero (1995) reporta descensos de nivel piezométrico por extracción de agua subterránea de hasta 3 y 5 m por año en algunas zonas de la Sabana. Estos valores son muy altos comparados con los comparados para producir los efectos registrados. El autor ha observado evidencia de sectores del occidente de la Sabana donde el descenso del nivel freático ha sido del orden de 5 m en 30 años (0.16 m/año), lo cual ha producido asentamientos de orden de uno o más metros en estas áreas, y descenso de nivel en acuíferos del Grupo Guadalupe de 20 m en 20 años (1m/año). Los valores varían dependiendo del sitio y las condiciones del área, pero es claro que los descensos de nivel piezométrico muy fácilmente pueden explicar los asentamientos que se han

registrado, y de hecho parecen ser mucho mayores que el cambio de esfuerzos efectivos que parece estar causando los asentamientos. Se debe tener en cuenta que estos procesos toman tiempo en completarse. Es decir, los valores del descenso de nivel piezométrico en un año tienen efecto sobre varios años mientras se completa la consolidación primaria y por largo tiempo después hasta cuando

los efectos de la consolidación secundaria ya son despreciables. Por lo tanto es posible que los efectos que se han venido observando corresponden al inicio de procesos de consolidación de largo plazo, y que por lo tanto se mantengan y muy posiblemente se incrementen hacia el futuro.

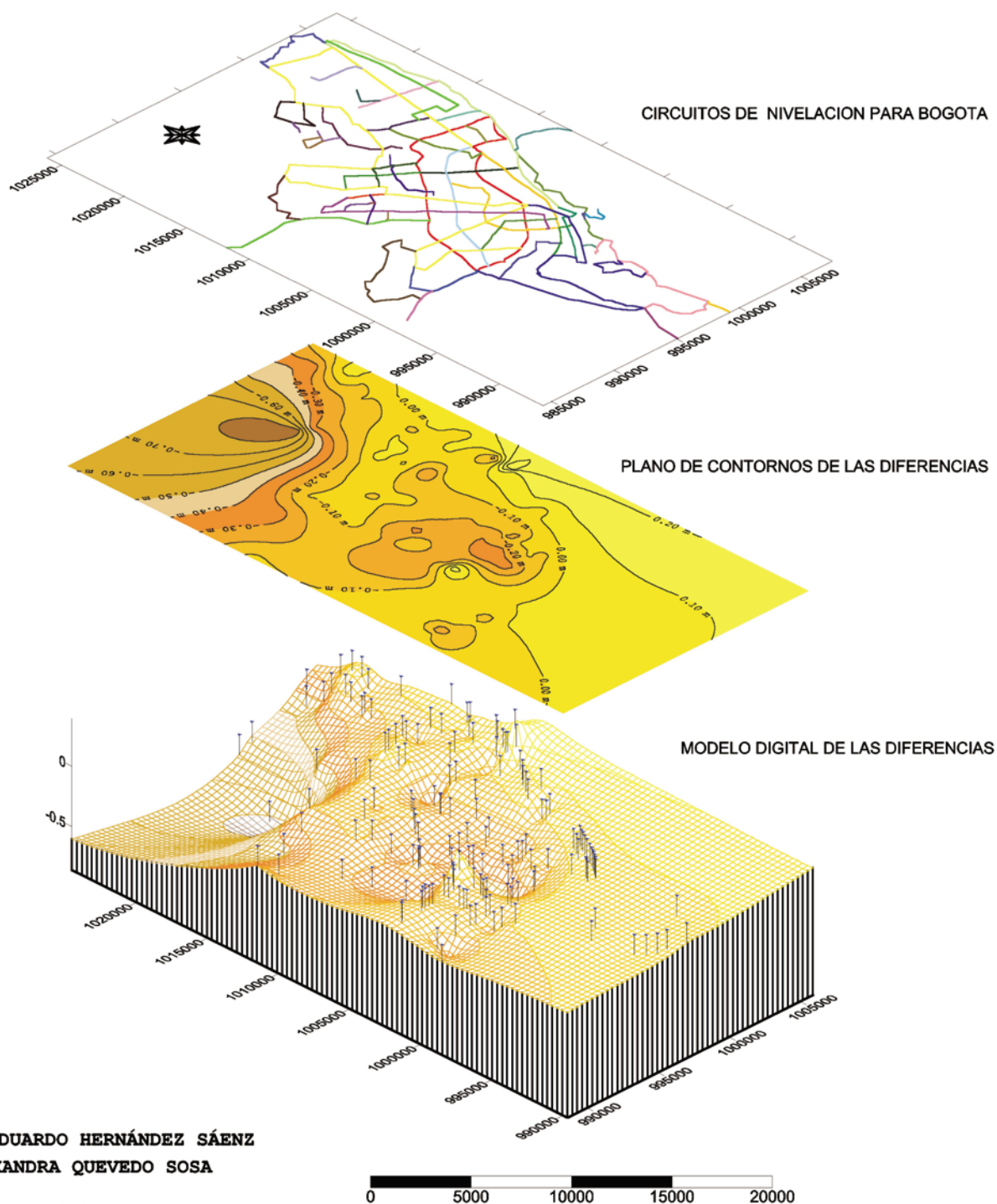


Figura 8 Asentamientos regionales tomado de Hernández, y Quevedo, (2003).

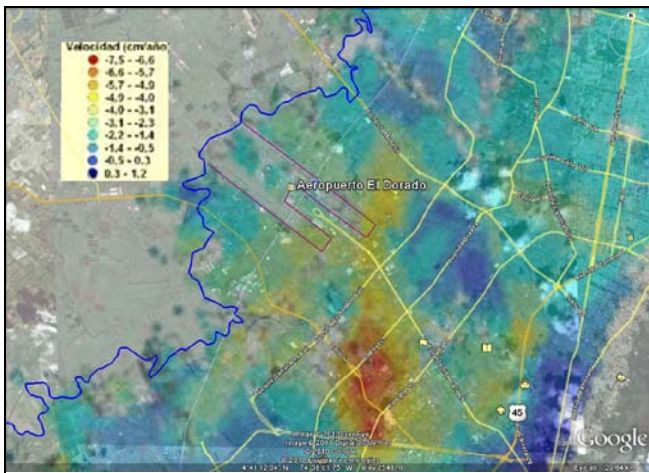


Figura 9 Tasas de asentamiento medidos en el estudio de la DPAE (Blanco y Barreto, 2010).

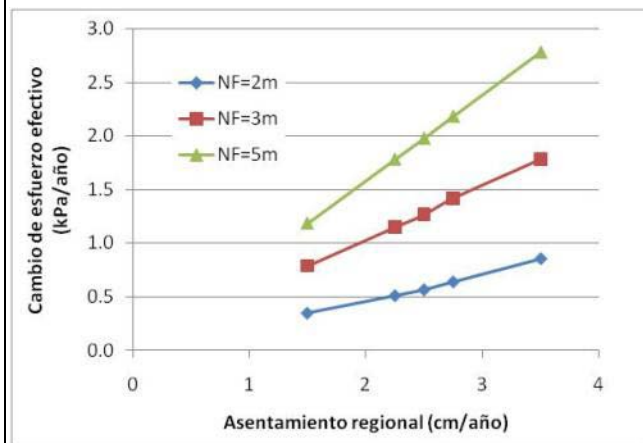


Figura 10 Relación entre cambios de esfuerzo efectivo y asentamientos por abatimiento del nivel freático calculados para diferentes profundidades del nivel freático.

5 CONCLUSIONES

Los análisis realizados han permitido evaluar el efecto de la compresión secundaria y los asentamientos por consolidación primaria en el perfil de suelos del sector del Aeropuerto y compararlos con los asentamientos regionales que se han venido midiendo en el área en la última década.

Estos análisis indican que la compresión secundaria, si bien ha debido tener un efecto del orden de 10 a 20 m en los asentamientos del depósito desde su formación, actualmente no debe estar aportando valores significativos a los asentamientos regionales.

Por otra parte los cambios de nivel piezométrico en el depósito que se están dando como respuesta al balance de evapotranspiración cerca de la superficie y por extracción de aguas subterráneas, sí pueden explicar fácilmente los asentamientos registrados. De hecho, la evidencia de cambios en

los niveles freáticos y piezométricos indica que estos son bastante mayores que los cambios de esfuerzos efectivos necesarios para producir los asentamientos registrados. El hecho de que los asentamientos registrados sean menores se puede deber a que el efecto de estos cambios toma tiempo en completarse por los procesos de consolidación primaria y secundaria.

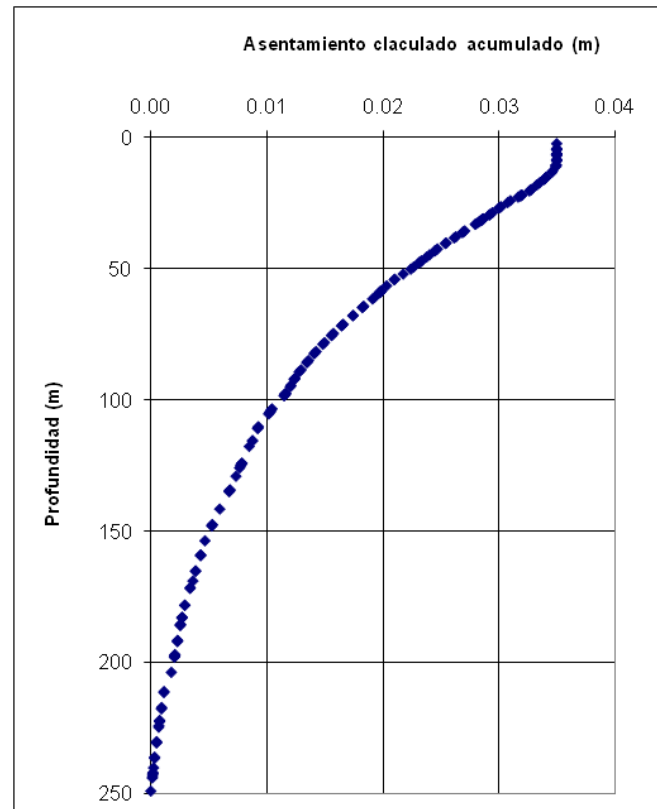


Figura 11 Variación de los asentamientos calculados en profundidad por abatimiento del nivel freático (NF inicial=3m)

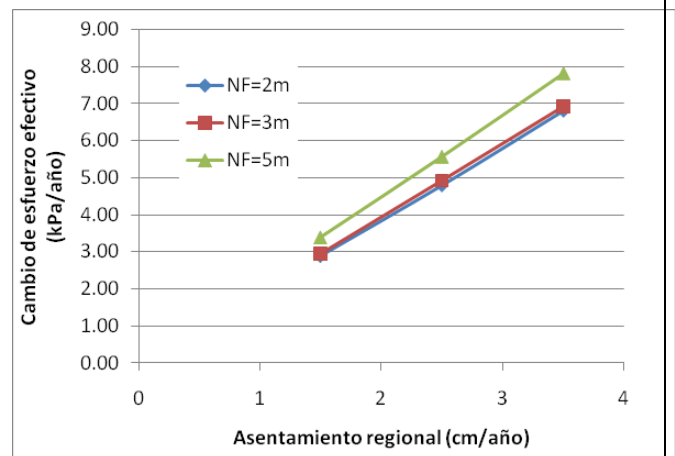


Figura 12 Relación entre cambios de esfuerzo efectivo y asentamientos por extracción profunda de agua calculada para diferentes profundidades del nivel freático.

Con base en estos resultados, es muy posible que los efectos que se han venido observando se mantengan, y que se hagan más fuertes hacia el futuro. Se considera que es necesaria información piezométrica precisa en los suelos de la Sabana para poder verificar y continuar con la valoración y entendimiento de estos procesos, particularmente que permitan establecer con precisión y evaluar los cambios que se vayan produciendo en el nivel freático.

REFERENCIAS

- Avila G. E., 1998. Instrumentación piezométrica para análisis de subsidencia en Santafé de Bogotá". VII Congreso Colombiano de Geotecnia. Sociedad Colombiana de Geotecnia, Santafé de Bogotá.
- Blanco P., Barreto G.,(2010) La interferometría diferencial DinSar – un atécnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D.C. Boletín Colombiano de Geotecnia No. 13.
- Cudmani, R. (2004) "Aspectos fundamentales del comportamiento de suelos blandos", Curso de viscohipoplasticidad. Universidad de los Andes, Bogotá.
- Entorno natural de 17 ciudades de Colombia (2007).Varios autores. Michel Hermelin (Editor), Universidad Eafit, ISBN 9588281709, 9789588281704. 344 pg.
- Hernández, L. & Quevedo, A. (2003). Determinación temporal de las diferencias de altura de la superficie del perímetro urbano de Bogotá D.C., mediante los datos de nivelación geodésica de los proyectos Catastro distrital: 1986 - 1996. Tesis Universidad Distrital Francisco. José de Caldas. Bogotá.
- INGEOMINAS, Universidad de los Andes (1997) "Microzonificación Sísmica de Santafé de Bogotá".
- Jeoprobe Ltda (2010), Sondeos de CPTu - Estudio geotécnico para la construcción del Interceptor Tunjuelo Canoas. Comunicación privada.
- Jeoprobe Ltda, (2008) Estudio para determinar las condiciones de suelos y la evaluación del comportamiento en el tiempo de las nuevas instalaciones de mantenimiento en el proyecto el nuevo dorado. OPAIN SA.
- Krieg, S., (2000) "Viskoses Bodenverhalten von Mudde, Seeton und Klei", Veröffentlichungen des Ins. für Boden.-Felsmechanik der Uni. Fridericiana in Karlsruhe, Nr.150.
- Loboguerrero, A. 1995. Descenso de niveles de agua subterránea en la Sabana de Bogotá. II Foro sobre la geotecnia de la Sabana de Bogotá., Soc. Col. de Ing. , Bogotá.
- Martínez, William, Sánchez, Laura, Herrera, Iván, Téllez, Laura (2008), Estimación de la Subsidencia en Bogotá a partir de mediciones GNSS y nivelación Geométrica. IGAC, Reunión Sirgas Montevideo
- Moya J.E., Rodríguez J.A. (1987). "The subsoil of Bogotá and the problems in Foundations". VIII Pan American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.
- Rodríguez J.A., (2006),. Avances recientes en la caracterización mecánica de suelos blandos de Bogotá. XI Congreso Colombiano de Geotecnia.
- Rodríguez, J., Alvarez, C., Velandia, E. (2008), Load rate effects on high strain tests in high plasticity soils. The Application of Stress-Wave Theory to Piles: Science, Technology and Practice. Proceedings of Stress Waves 2008. Edited by: J.A. Santos. Millpress.
- Torres, V. Vandenberghe, J., Hooghiemstra, H., 2005, An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 226 (2005) 127– 148