



Proyecto de estabilización del faldeo sur del cerro Chenque, Comodoro Rivadavia

Stabilization project of southern slide of mount Chenque, Comodoro Rivadavia

Francisca, Franco M. ^{1,2} ✉ - Pinto, Federico ^{1,2} - Abril, Ernesto G. ¹ - Van De Velde, Germán ³ - Alvarez Muguerza, Matias ⁴

Recibido: 22 de abril de 2015 • Aceptado: 30 de marzo de 2017

Resumen

La Ciudad de Comodoro Rivadavia, se ha desarrollado al pie del cerro Chenque. La urbanización ha ido avanzando parcialmente sobre la base del faldeo Sur de esta singular elevación aledaña a la costa atlántica, en el golfo de San Jorge. Históricamente, el cerro Chenque ha manifestado sus condiciones de inestabilidad con sucesivos deslizamientos en sus laderas. En este trabajo se presenta un análisis de las características geológicas y geotécnicas relevantes consideradas para el proyecto de estabilización del faldeo Sur de este cerro ubicado en el sector Norte de la ciudad de Comodoro Rivadavia, sobre la costa marítima de la provincia de Chubut, aproximadamente a los 45°52', entre las Rutas Provinciales 26 y 39. El estudio consistió en proyectar los taludes verificando la estabilidad local y general de los mismos. Para ello se utilizó modelos numéricos basados en análisis de equilibrio límite y modelaciones utilizando el método de elementos finitos. Los resultados obtenidos permitieron arribar a la geometría de los taludes con niveles de seguridad recomendados en la literatura y minimizando el volumen de excavaciones.

Palabras Claves: cerro Chenque, proyecto geotécnico, ladera, modelo numérico.

Abstract

The City of Comodoro Rivadavia, has developed at the foothill of the "Cerro Chenque" and the urbanization has expanded partially towards the lower part of the southern slope of this formation, adjacent to the Atlantic coast, in the gulf of San Jorge. Historically, the Chenque hill has undergone several landslides, of considerable magnitude in some cases, with tragic outcomes for the population dwelling in the vicinity of the hill. This paper presents an analysis of the geological and geotechnical features relevant for a stabilization project of the southern hill of the Chenque, located in the north sector of the city of Comodoro Rivadavia, along the coastline of the Chubut province, at latitude of 45°52', among the RP 26 and 39 routes. Local and global safety of slopes was verified by means of limit equilibrium and finite element methods. Obtained results help to obtain the geometry for the slopes that assure the required safety level and at the same time minimizes excavations volume.

Keywords: Chenque, geotechnical project, landslide, numerical model.

1. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (UNC)

2. Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología (IDIT, UNC-CONICET), Córdoba, Argentina.

3. Graduado de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, Mención Estructuras y Geotecnia de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (UNC)

4. CONSULAR, Consultores Argentinos Asociados S.A.

INTRODUCCIÓN

El cerro Chenque está constituido por dos formaciones geológicas sedimentarias que definen una situación de riesgo geológico elevado. El cerro se ubica al norte de la ciudad de Comodoro Rivadavia, sobre la región costera marítima de la provincia de Chubut, aproximadamente a los 45°51' latitud Sur y 67°29' longitud Oeste, entre Ruta Provincial 26 (RP26) y Ruta Provincial 39 (RP39). La Figura 1 presenta la ubicación del área en estudio.

Comodoro Rivadavia se caracteriza por la presencia de cañadones y valles perpendiculares a la costa, producto de la erosión hídrica originada en los desagües provenientes de las pampas de Salamanca y del Castillo y de la Meseta Espinosa, relieves mesetiformes de una altura de aproximadamente 700m. Los cañadones son estrechos en sus orígenes, ensanchándose a medida que descienden hacia el mar. La ciudad y sus barrios periféricos se fueron desarrollando sobre el faldeo Sur del cerro Chenque (213 msnm), una elevación relictual alargada en dirección Este-Oeste.

Históricamente, en el cerro Chenque se han manifestado sucesivos deslizamientos de laderas. En algunos casos alcanzaron notable envergadura, con resultados trágicos para la población de los alrededores. La Ciudad de Comodoro Rivadavia ha ido avanzando parcialmente sobre la parte inferior del faldeo Sur de esta singular elevación, debido a lo cual la ocupación del

suelo ha generado situaciones de riesgo ambiental de carácter geológico.

Diferentes antecedentes destacan deslizamientos históricos en tres zonas fundamentales que incluyen la ladera Este del Cerro, la Terminal de carga de combustibles del barrio General Mosconi y el faldeo Sur del Chenque. Las situaciones más críticas y reiterativas que han merecido estudios específicos se han dado sobre el faldeo oriental. En 1995 se produjo un gran deslizamiento que cortó la Ruta Nacional 3 (RN3), fue una reactivación importante de movimientos que se venían ya observando desde principios del Siglo XX. Hacia el Sur, una zona de deslizamientos de menor magnitud afectó a la citada Ruta Nacional en sucesivas pulsaciones (años 1999 y 2000), observándose su avance constante hacia la vía principal de acceso a la ciudad. Dichos movimientos se caracterizaron por tener diferentes velocidades, por producirse fallas locales con diferente extensión areal y otras de tipo globales en sectores específicos.

En la zona a la que se refiere este estudio, se han detectado y analizado en el pasado movimientos relacionados con antiguos procesos de remoción en masa. Sobre la calle Sarmiento (proximidades de la ruta RN 3), se han desarrollado pulsos de reactivación sobre el lóbulo de un antiguo deslizamiento existente a principios del siglo pasado. En 1993, se produjeron levantamientos y desplazamientos localizados en la carpeta asfáltica, cordón cuneta y veredas de la calle Sarmiento.

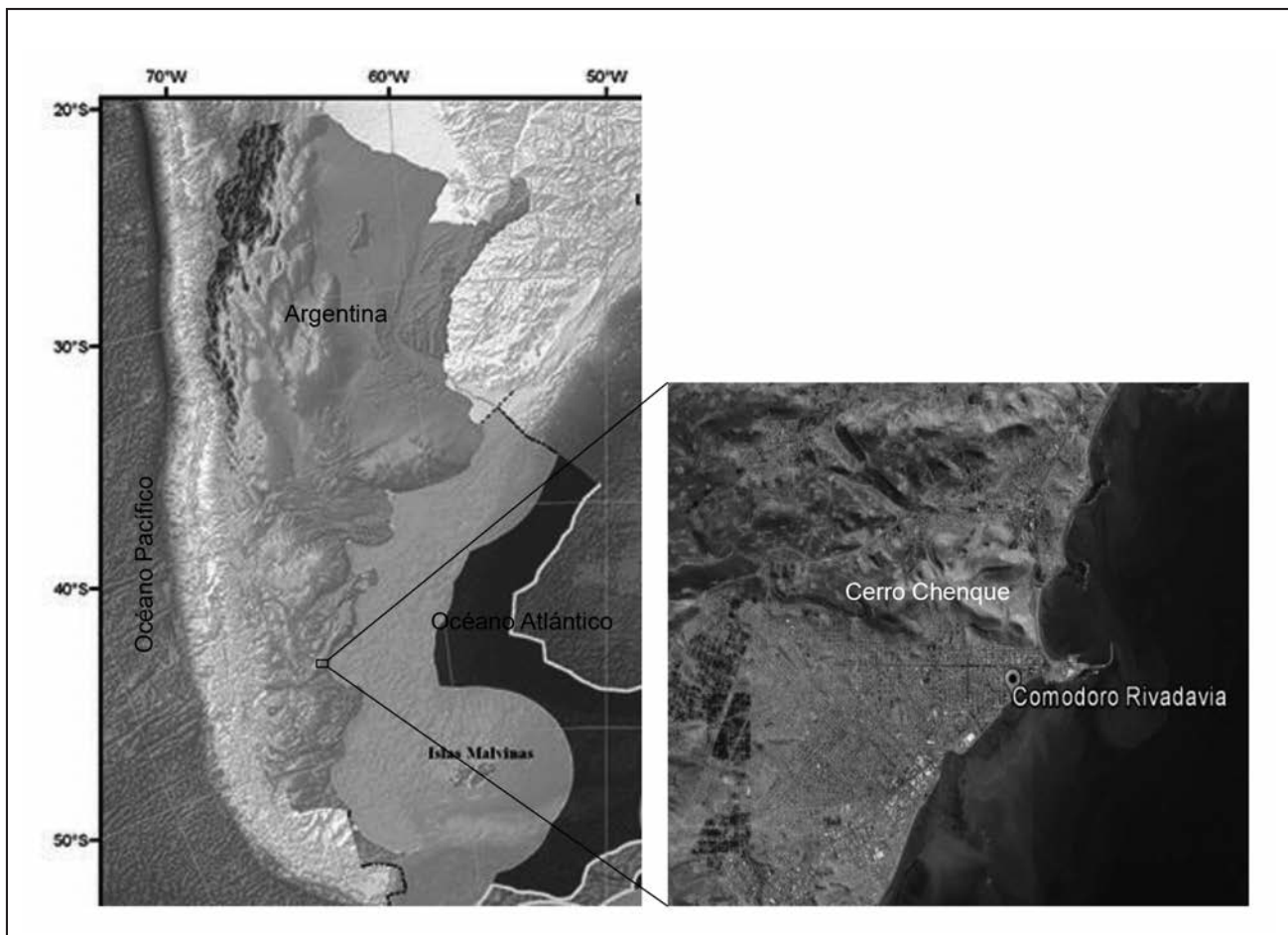


Figura 1. Ubicación del área en estudio.

La ocurrencia de numerosos movimientos registrados fue muy importante en términos geológicos, por lo cual la amenaza frente a posibles nuevos deslizamientos fue considerada como elevada. Por otra parte, la ocupación del suelo en áreas marginales de la ciudad, particularmente vulnerables al respecto, provoca una situación de alta sensibilidad que ha sido advertida ya por las autoridades y obliga a su consideración socioeconómica urgente.

Este estudio evalúa la amenaza de deslizamientos en el faldeo sur del cerro Chenque y explicita un proyecto de estabilización que comprende las intervenciones necesarias para evitar futuros episodios. En general, los problemas a resolver se han centrado en disminuir la infiltración en los sedimentos y favorecer el rápido escurrimiento de las aguas superficiales y la disminución de las pendientes.

El objetivo del trabajo es analizar la información existente y a partir de estudios geotécnicos, topográficos y geológico-geotécnicos desarrollar el proyecto ejecutivo para la estabilización del faldeo sur del cerro Chenque. Las soluciones propuestas consistieron en un reperfilado de la ladera mediante un sistema de bermas, muros de hormigón proyectado y anclajes. En este trabajo se discuten distintos diseños alternativos, presentándose una descripción de los análisis realizados y los resultados de modelaciones numéricas de las soluciones propuestas para la alternativa seleccionada, la cual fue construida en los años 2012 a 2015.

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

Con referencia al marco geológico regional, Comodoro Rivadavia se ubica hacia el centro de la llamada Cuenca San Jorge (Figura 1), que posee un área de deposición cuya historia geológica está dada por sucesivas etapas de deposición marinas y continentales. La última de ellas es precisamente de naturaleza continental y se encuentra representada por los conocidos rodados patagónicos, que cubren las zonas altas de la meseta.

En la Hoja Geológica Comodoro Rivadavia, 4566-III. Provincia del Chubut se describe detalladamente la secuencia estratigráfica de la zona. En las costas se hace presente la Formación Salamanca (marina), con una sección inferior de coquinas y una superior de carácter epiclástico, con areniscas y pelitas del tipo de las arcillas bentónicas, de comportamiento plástico. A continuación, se localiza la Formación Río Chico, continental, de areniscas, arcillitas, piroclastitas y algunos conglomerados (González Díaz 2004). La Formación Sarmiento sobreyace a la anterior y se encuentra integrada por tobas, chonitas, algunos conglomerados y paleosuelos. Sucede a la anterior un conglomerado basal que corresponde a la formación Chenque, de origen marino, seguida por areniscas y tobas con yeso en sus grietas, areniscas y arcillitas tobáceas. La secuencia culmina con arcillitas calcáreas que gradan a areniscas. Por encima de la formación Chenque se halla la Formación Santa Cruz, conformada por areniscas poco consolidadas, fangolitas tobáceas, tobas cineríticas, algunos conglomerados y paleosuelos.

El mapa de zonificación sísmica de la Argentina (INPRES), presenta un coeficiente sísmico zonal (a nivel provincia) muy bajo en la costa (0,013) hacia valores medios al Oeste. La intensidad sísmica máxima que podría tener un sismo en el término de 100 años corresponde a un valor menor a VI.

Las formaciones geológicas sedimentarias que condicionan la situación son la formación Sarmiento (Eoceno Oligoceno)

(Feruglio 1949; Frenguelli 1929) y la formación Patagonia (Oligoceno) (Sciutto et al., 1999), designada luego como formación Chenque (Bellossi, 1990; Paredes y Colombo 2001). La Formación Sarmiento es de origen continental y la componen tobas finas, blanquecinas, amarillentas y grises mientras que la formación Chenque, que suprayace a la anterior a partir de una superficie de erosión, es de origen marino y está compuesta por una secuencia inferior, predominantemente arcillosa y profusamente diaclasada, y una superior más arenosa. Dichas formaciones se caracterizan por finalizar en bancos de areniscas calcáreas con matriz pelítica y bancos fosilíferos y por presentar sedimentos en disposición sub-horizontal con suave inclinación regional hacia el sureste. La Formación Sarmiento aflora desde la base del cerro Chenque (sobre la costa) y permite el desarrollo de lomadas, faldeos y bordes de cañadones y barrancos, asociados con restingas sobre la franja costera (Hirtz et al., 2000).

La geomorfología resultante en el faldeo Sur del cerro Chenque corresponde a un relieve estructural disectado consecuencia de diferentes condiciones climáticas, y erosión eólica intensa (se destacan procesos de remoción en masa que pueden ser verificados en laderas (Schillizzi et al., 2004).

Geotécnicamente, si bien el riesgo geológico actual se encuentra reconocido como circunscripto al tipo de los llamados *deslizamientos súbitos*, dentro del género de los fenómenos de remoción en masa no deben dejar de tenerse en cuenta las pequeñas situaciones de arroyada ni los lentos flujos de arrastre (*creep*) que pueden tanto quedar en ese ámbito o ser el anuncio de despegues súbitos de la masa de suelo comprometida. De acuerdo con lo expresado por González Díaz (2004), que observara una serie de avalanchas hacia el Norte de Comodoro Rivadavia, el factor inductor de estos fenómenos estaría supelementalmente relacionado con precipitaciones bajo condiciones climáticas más húmedas que asigna a tiempos indeterminados de la glaciación cuaternaria, incluyendo entre las probabilidades tiempos posglaciales. Si bien en el lugar hay escasas precipitaciones (aproximadamente unos 261 mm anuales), se destaca en ocasiones su elevada intensidad, lo cual se traduce en problemas de relevancia en particular en lo que se refiere al flujo de lodos y arrastre de sedimentos.

En cuanto a los deslizamientos de ocurrencia súbita o veloz, se verifican los de tipo rotacional y los ocasionados a manera de aluvión, ante las precipitaciones relativamente intensas para la zona. Los primeros se producen según las designadas superficies de rotura, superficies curvas cóncavas. En general estos deslizamientos afectan los estratos arcillosos y en muchas ocasiones se descalzan las areniscas produciéndose la caída de bloques y arcillas de la formación Chenque. Se verifica escasa deformación interna. De acuerdo a Vanes (1978) y Hung et al. (2014) los deslizamientos más frecuentemente observados serían del tipo traslacional (o poco profundos) materializándose eventualmente fallas del tipo rotacional o profundas cuando se moviliza los estratos de arcillitas y tobas. Sin embargo, como en muchos sectores costeros los deslizamientos son complejos observándose desde movimientos en masa de carácter súbito, como las avalanchas, y otros lentos como la reptación, hasta eventos donde se registran los fenómenos de flujo arriba descritos (Schillizzi et al., 2004). Como consecuencia de estos procesos de remoción en masa, la parte superior se desplaza hacia abajo por acción de la gravedad y su coronamiento bascula hacia el escarpe, que resulta en una pared prácticamente vertical y sin sustento, con posibilidad de nuevos movimientos que originan el constante retroceso de la geoforma (Barletta et al., 2009).

DESCRIPCIÓN DE LAS TAREAS REALIZADAS

El estudio consistió en una recopilación de antecedentes generales y específicos del área de estudio necesarios para analizar la estabilidad de taludes, anclajes y muros propuestos en la etapa de anteproyecto. Para los estudios geológicos, geomorfológicos, topografía general, drenaje, clima, hidrología y vegetación se recurrió al análisis de información disponible en diferentes documentos públicos y a las notas y experiencias previas al estudio elaborado en la Terminal YPF (Abril, 2010), consultándose además pares estereoscópicos (Esc: 1:40000) y diferentes escenas Quick Bird disponibles en el servidor Google Earth. El procesamiento digital de imágenes se efectuó utilizando el *software* IDRISI con el solo objeto de analizar y detectar deslizamientos históricos.

La topografía de la zona fue obtenida a partir de un levantamiento planialtimétrico realizado con estación total generándose curvas de nivel cada 1 metro y con cotas IGM y los datos fueron discretizados mediante *software* específico (CivilCAD) y las coordenadas obtenidas en la etapa de anteproyecto.

El estudio geotécnico fue realizado a partir de seis perforaciones, de las cuales 3 están ubicadas sobre la carretera "Centenario" y 3 en el faldeo Sur del cerro Chenque. A partir de este estudio, complementario de los antecedentes preexistentes del anteproyecto, y a partir del estudio geológico, se determinaron las propiedades físicas y mecánicas de cada uno de los estratos y formaciones que conforman el cerro Chenque (Formación Chenque). La Figura 2 presenta una imagen satelital del sector en estudio donde puede verse la posición de la calle Centenario, el cerro Chenque, el mirador del mismo y al sur la ciudad de Comodoro Rivadavia.

La Figura 3 muestra que el perfil transversal tipo, compuesto por un primer estrato de limo-arcilla con $N_{spt} < 10$, un segundo estrato de arcilla con N_{spt} entre 10 - 25, un tercer estrato de arena con presencia de arenisca con $N_{spt} > 50$, el cuarto estrato de arcilla consolidada con $N_{spt} > 50$ y un estrato de arcilla con N_{spt} entre 4 y 25. Este último estrato fue dividido en dos, adoptando el criterio del $N_{spt} < 10$ para uno de ellos y $10 < N_{spt} < 25$ para el otro (sedimento deslizado 1 y sedimento deslizado 2). Las principales propiedades físicas y mecánicas de cada uno de estos estratos se presentan en la Tabla 1 y los valores fueron adoptados a partir de datos directos y correlaciones utilizando los resultados del estudio de suelo y valores recopilados en el estudio de antecedentes para este lugar (Francisca y Rinaldi, 1997; y Barleta et al., 2009).

Las verificaciones geotécnicas se realizaron en 53 perfiles transversales que se extienden sobre la carretera y que presenta amenaza de inestabilidad (Av. Alsina, Carretera Centenario y camino de acceso al Mirador). Los perfiles se ubicaron de manera prácticamente regular a lo largo de todo el desarrollo del faldón sur del cerro Chenque, lo cual significó generar un modelo numérico cada 25 metros. Para cada uno de los perfiles se realizaron verificaciones de estabilidad, adoptándose parámetros resistentes para cada uno de los estratos. La verificación de la estabilidad global se realizó a partir de la modelación numérica de cada uno de los 53 perfiles considerados inestables. Esta verificación fue elaborada para cada perfil, tanto a corto como a largo plazo. El modelo constitutivo se considera como elastoplástico perfecto para el suelo del tipo Mohr-Coulomb, asignando las propiedades tenso-deformacionales y resistentes de los suelos, en función de los estudios de suelo disponibles.

La herramienta de cálculo utilizada para las verificaciones de estabilidad fue un *software* de cálculo de equilibrio



Figura 2. Vista del faldeo sur del cerro Chenque previo a la intervención proyectada [imagen satelital capturada el 24 de febrero de 2011].

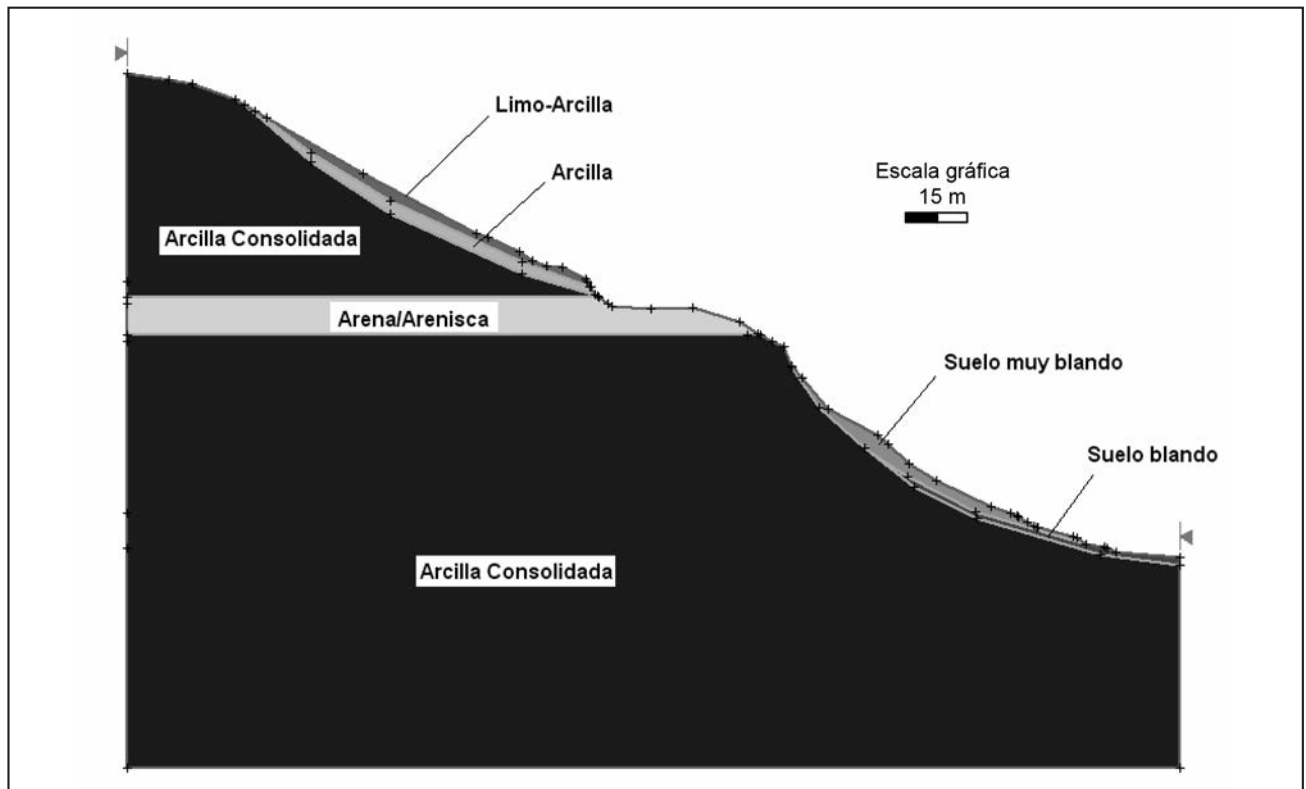


Figura 3. Perfil transversal típico de los modelos desarrollados (se corresponde con el perfil de la latitud 67°29'18.86"O).

Tabla 1. Propiedades físicas y mecánicas adoptadas durante la modelación.

| Propiedades de los materiales para verificación a corto plazo | | | |
|---|-------------------------------|---------------------------|-------------|
| Estrato | γ [kN/m ³] | c [kN/m ²] | ϕ [°] |
| Limo - Arcilla | 14,1 | 59 | 0 |
| Arcilla | 14,8 | 133 | 0 |
| Arena/Arenisca | 19,1 | 225 | 0 |
| Arcilla Consolidada | 20,0 | 200 | 40 |
| Suelo muy blando | 15,2 | 76 | 0 |
| Suelo blando | 18,1 | 156 | 0 |
| Propiedades de los materiales para verificación a largo plazo | | | |
| Estrato | γ [kN/m ³] | c' [kN/m ²] | ϕ' [°] |
| Limo - Arcilla | 14,1 | 11 | 31 |
| Arcilla | 14,8 | 11 | 31 |
| Arena/Arenisca | 19,1 | 10 | 39 |
| Arcilla Consolidada | 20,0 | 200 | 40 |
| Suelo muy blando | 15,2 | 12 | 28 |
| Suelo blando | 18,1 | 15 | 28 |

límite, y de análisis de estabilidad de taludes/laderas que trabaja con análisis de estado plano (2D). Se caracteriza por tener un CAD basado en interfaz gráfica, con una amplia variedad de modelos y opciones de interpretación de datos, las que permiten realizar análisis completos y rápidos. El programa analiza la estabilidad en superficies de deslizamientos usando métodos determinísticos de equilibrio límite con slicings verticales y

permite aplicar diferentes métodos de análisis para el cálculo del factor de seguridad. El método utilizado en este trabajo para la obtención de los factores de seguridad en los modelos realizados es el propuesto por *Spencer (1967)*. Como criterio de diseño, se adoptó un factor de seguridad de 1,50 bajo condiciones de cargas permanentes para todas las obras proyectadas por debajo de la carretera Centenario y un factor de seguridad de

1,30 para los estratos que están por encima de la misma. La Figura 3 muestra una sección tipo modelada.

Por otro lado, se desarrollaron modelos más sofisticados para lo cual se utilizó el método de elementos finitos. A partir de estos modelos, se pudo verificar además el comportamiento de los muros propuestos, evaluar la influencia de la interacción suelo-estructura y cuantificar los desplazamientos esperados en los muros con bulones. La ventaja de estos modelos radica en la posibilidad de determinar, además del factor de seguridad frente a potenciales deslizamientos, el comportamiento tenso-deformacional de todos los elementos componentes del sistema modelado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El proyecto de estabilización del cerro Chenque en el sector considerado comprende tareas de movimiento de suelo y roca, con el objeto de obtener un perfil estable en el faldeo Sur, diseñándose perfiles consistentes en bermas y muros de contención. El diseño se caracteriza por tener un ángulo medio de inclinación de 29° para el sistema, estando constituido por bermas de 4,5m de ancho con taludes con una pendiente 1:1,15 y una altura de 8,25m entre bermas. En todos los casos, los perfiles de diseño se obtienen con excavación (no hay relleno) y, cuando la pendiente natural de las laderas en el cerro resulta

satisfactoria desde el punto de vista de la seguridad, no se realizan obras de reperfilado sobre el mismo.

Como condicionantes del diseño, se consideró la imposibilidad de mover la línea de edificación o construcciones actuales, minimizar el movimiento de suelo para lograr los factores de seguridad recomendados en la ingeniería geotécnica, la imposibilidad de modificar la traza de la calle Centenario y minimizar los movimientos de suelo asociados a la reubicación del mirador y sus accesos. Debido a la limitación física de cambiar la traza de la calle y posición del mirador en sectores fue necesario el perfilado del talud mediante un corte prácticamente vertical. Debido a esto, se generó un corte en roca con altura variable de hasta 20m en zonas próximas al camino mencionado. A pesar de que el sector es estable sin tratamiento alguno debido a la presencia del banco de areniscas, se colocó un muro de hormigón proyectado para evitar los procesos de alteración en la roca observados regionalmente.

La Figura 4 presenta los resultados de modelos de estabilidad global utilizando el método de equilibrio límite de una sección típica sin muro de contención. La Figura 4a presenta los resultados de un modelo de la configuración o geometría original de la ladera donde el factor de seguridad obtenido FS fue de 1,009 (menor a lo recomendado), mientras que la Figura 4b presenta los resultados obtenidos para la sección proyectada

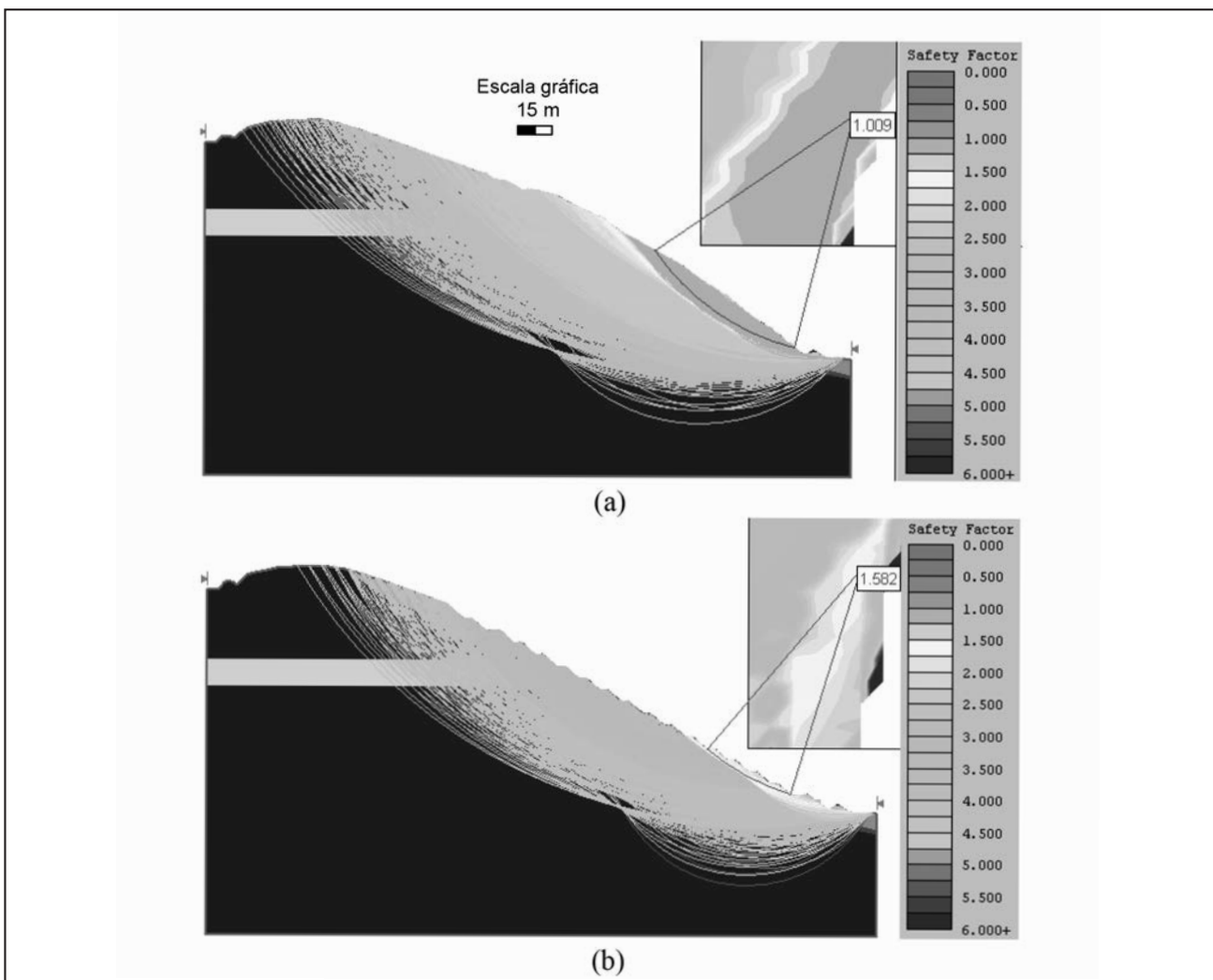


Figura 4. Verificación de estabilidad a largo plazo en sección sin muro de contención: (a) terreno natural y (b) sección propuesta.

resultando un $FS = 1,582$. La presencia de las bermas permitió mantener una pendiente media que satisfaga los niveles de seguridad adecuados y minimizar el movimiento de suelo. La altura de las bermas se determinó evaluando la posibilidad de ocurrencia de fallas de tipo local en las bermas cuya pendiente en los taludes es más elevada como se mencionara precedentemente.

Los muros de contención planificados consisten en cortes en la roca con una pendiente de 10° con respecto a la dirección vertical, y la posterior construcción de un muro con hormigón proyectado con malla.

Estos muros son de altura variable, con un máximo de 20m, y se encuentran reforzados con anclajes pasivos consistentes en barras de acero de 32mm, con una longitud máxima de 12m. La Tabla 2 presenta la separación adoptada para los anclajes en muros de distintas alturas. La separación y longitud de los anclajes se fijó de manera de minimizar los metros de anclaje y garantizar la estabilidad de los cortes frente a posibles fallas locales (del propio muro) y globales (del talud en general). Estos muros se generan con el objeto de no replantear la calle Centenario, ubicada en la parte alta de la ladera, y con el objeto de minimizar el movimiento de suelo aprovechando la presencia del estrato de areniscas (en gran parte del desarrollo de la ladera) cuyas características geológicas y geotécnicas indican que resulta factible mantener este tipo de corte si se realiza una protección contra la erosión, función que se cumple con el muro proyectado.

El proyecto especifica que los taludes deben ser revestidos y protegidos contra la erosión mediante un sistema de hidrosiembra, pudiendo colocarse geosintéticos que cumplan la función de protección temporaria hasta tanto la hidrosiembra permita el desarrollo de vegetación autóctona que proteja el talud. Para evitar la acumulación de agua detrás del hormigón, se colocarán sistemas de drenes que cumplirán la función de evacuar el agua que acumulada en la arenisca y la arcilla, detrás del hormigón. Consistirán en perforaciones inclinadas 20° con respecto a la horizontal, siendo el punto más bajo el lugar por donde afloraría el agua en el faldeo del cerro. Estas perforaciones tendrán un diámetro mínimo de 65mm y una longitud mínima de 4m, pudiendo extenderse hasta una longitud

máxima aproximada de 7m en la posición de los muros de mayor altura y con una separación de 5m entre sí. En estas perforaciones se colocará un tubo de PVC ranurado protegido por un geotextil que cumple la función de separación y filtro.

Para tener en cuenta posibles acciones transitorias durante la construcción, se verificaron las secciones y bermas a corto plazo, suponiendo una carga de $W_{máq} = 100$ kN aplicada sobre una superficie de $10m^2$. La tensión equivalente (σ_{equiv}) aplicada sobre la berma es de 10 kN/m². Los resultados indican que la berma es estable frente a cargas temporales, obteniéndose un factor de seguridad adecuado en todos los casos. De la misma manera, se verificó la capacidad portante de la berma de ancho 4,50m y el peso de la maquinaria $W_{máq}$ para lo cual se utilizó la solución *Meyerhof (1957)* y las formulaciones propuestas por *Hansen (1970)* y *Vesic (1975)*. En todos los casos, los factores de seguridad resultaron satisfactorios.

La Figura 5 presenta los resultados de modelos de estabilidad global utilizando el método de equilibrio límite de una sección típica con muro de contención. La Figura 5a presenta los resultados para la geometría original de la ladera, obteniéndose un $FS=1,195$ (menor a lo recomendado). La Figura 5b presenta los resultados obtenidos para la sección proyectada resultando un $FS = 2,212$.

La verificación de la estabilidad local del sistema muro-anclaje se realizó a partir de la modelación numérica de perfiles transversales considerados como inestables previo a la construcción del muro y anclajes. Dichos modelos consideran un modelo constitutivo elastoplástico perfecto para el suelo de tipo Mohr-Coulomb. La herramienta de cálculo utilizada para las verificaciones fue un modelo numérico en elementos finitos.

La Figura 6 presenta un resultado de las verificaciones mediante elementos finitos de la estabilidad muro-anclaje. En todos los casos modelados, los factores de seguridad resultaron $FS > 1,5$, debiendo colocarse mayor cantidad de anclajes y de mayor longitud a medida que el corte vertical se hace más alto (Tabla 2). De esta manera, las secciones con muros de hormigón proyectado se diseñaron con una inclinación de 10° con relación a la vertical, mientras que la inclinación adoptada para los anclajes fue de 25° y el espesor del muro necesario es de 20cm (Ver detalles en Figura 7).

Tabla 2. Resultados obtenidos en modelaciones evaluadas.

| H_{muro} [m] | Nº de anclajes | Separación horizontal [m] | Separación vertical [m] | $L_{anclaje}$ [m] | Anclaje | F_{axial} [T] |
|-----------------|----------------|---------------------------|-------------------------|-------------------|----------|-----------------|
| 11 m < H < 14 m | 3 | 4 | 3 | 8 | Superior | 3,4 |
| | | | | | Medio | 8,6 |
| 14 m < H < 17 m | 4 | 3 | 3 | 10 | Superior | 4,1 |
| | | | | | Medio | 13,7 |
| 17 m < H < 19 m | 5 | 3 | 3 | 12 | Superior | 3,7 |
| | | | | | Medio | 9,5 |
| 19 m < H < 20 m | 6 | 3 | 3 | 12 | Superior | 3,7 |
| | | | | | Medio | 13,9 |

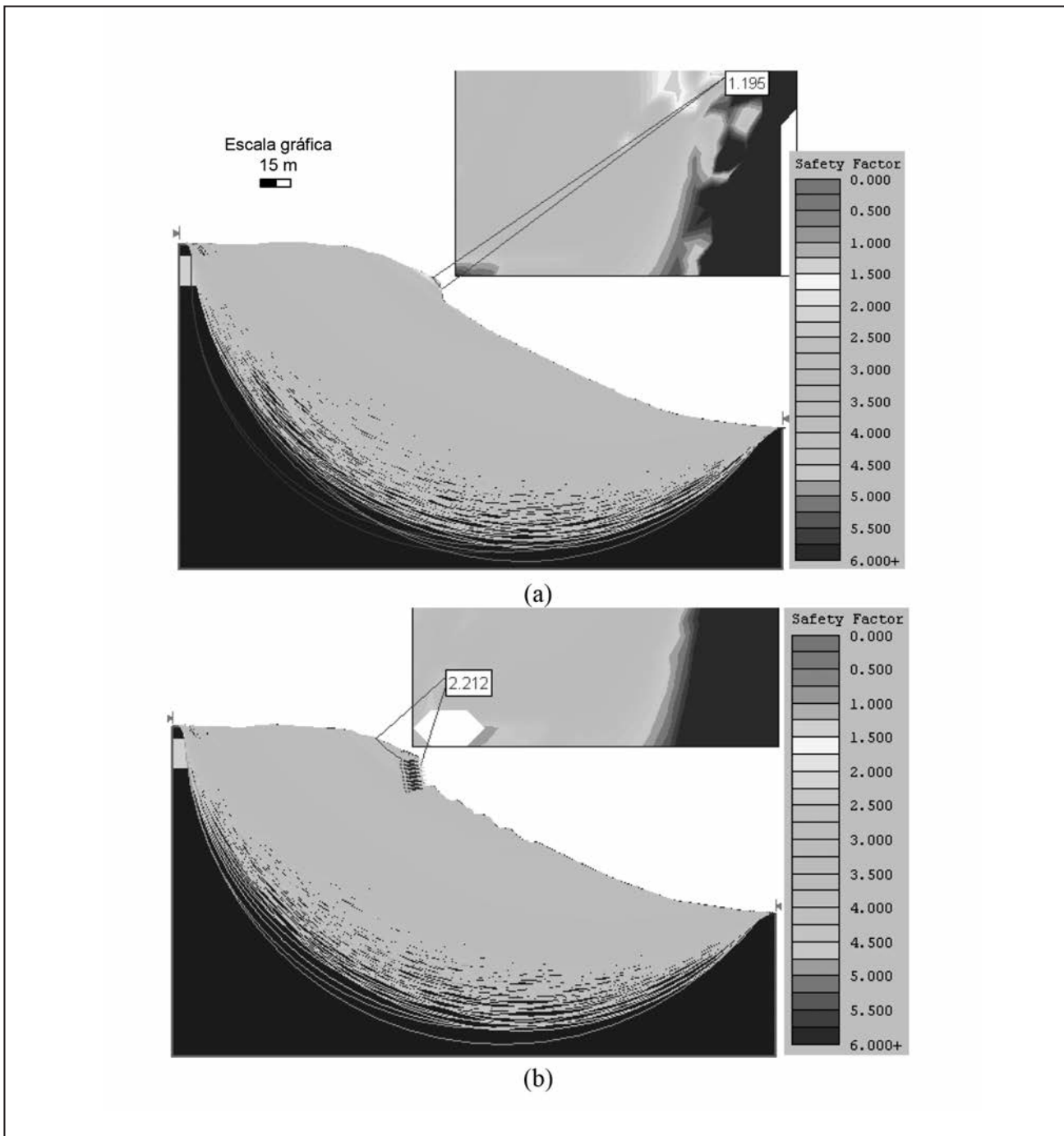


Figura 5. Verificación de estabilidad a largo plazo en sección con muro de contención: (a) terreno natural y (b) sección propuesta.

El diseño de los anclajes incluyó además verificaciones del área de acero mecánica, para lo cual se mayoraron (aumentaron) las cargas de tracción obtenidas en el modelo de elementos finitos mediante un factor de 1,50 (lo cual supone anclajes permanentes). Se realizó además la verificación frente al deslizamiento de la barra de anclaje-bulbo, el arrancamiento del bulbo y la resistencia de la placa de apoyo del anclaje, verificando que la tensión de corte actuante sea menor a la tensión de corte admisible del acero. La Figura 8 muestra un detalle de la geometría propuesta para los anclajes, placa de apoyo y muro de hormigón proyectado.

Finalmente, se destaca que el proyecto resultó aprobado y se comenzó a materializar la construcción desde el 2012 hasta fines del 2014. La Figura 9 presenta una imagen satelital donde puede verse el faldeo Sur del cerro Chenque con las bermas propuestas construidas. La comparación entre las Figuras 9 y 2 permite evidenciar la magnitud del proyecto. La solución implementada ha contribuido a reducir la amenaza de deslizamientos que pongan en riesgo a las personas y construcciones civiles en el Norte de la ciudad de Comodoro Rivadavia.

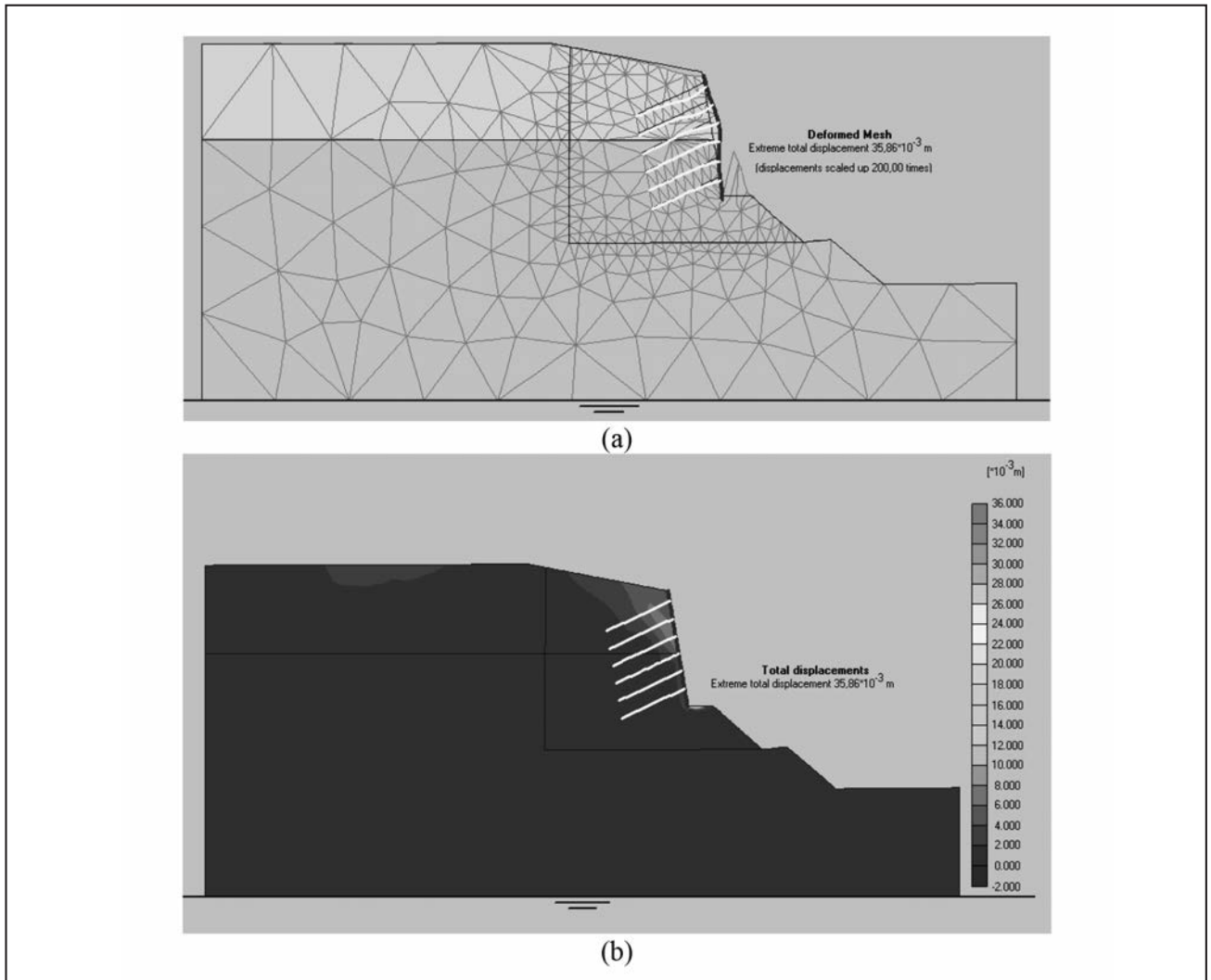


Figura 6. Verificación de estabilidad a largo plazo del Perfil 1 (P1). (a) deformación de la malla = $35,86 \times 10^{-3}m$; (b) desplazamientos totales = $35,86 \times 10^{-3}m$ (Altura del muro con anclajes = 20 m).

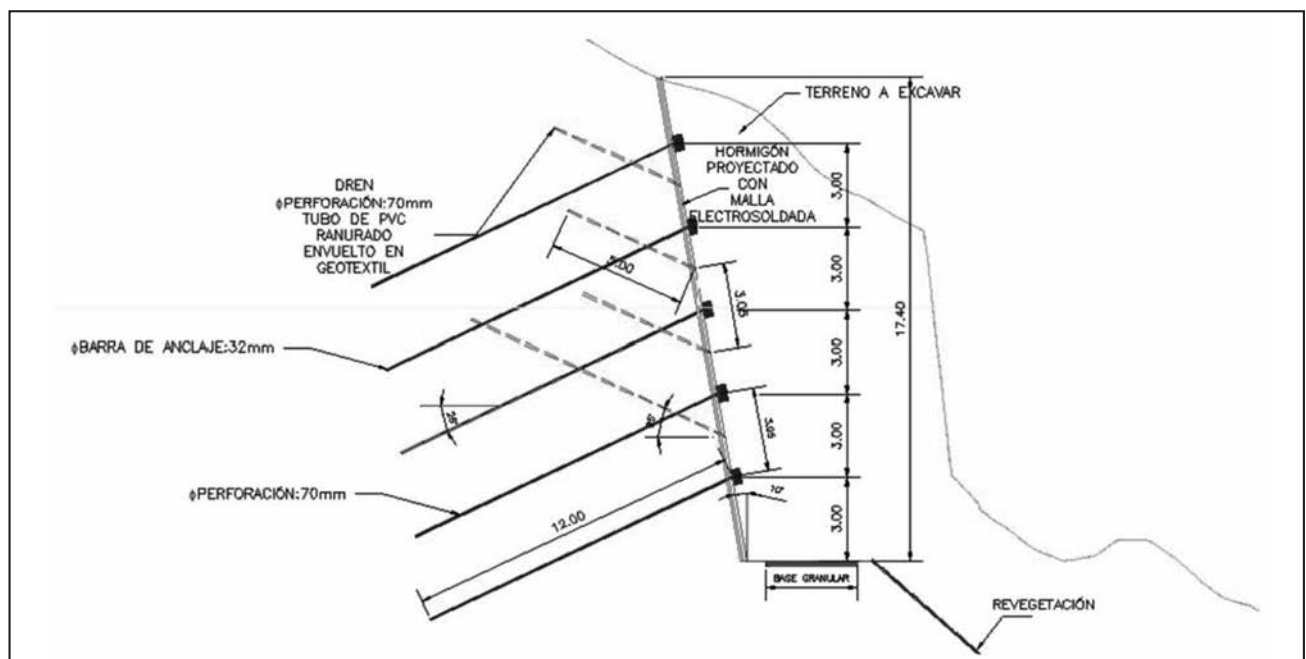


Figura 7. Distribución de bulones propuesta para muros con altura entre 14 y 17m.

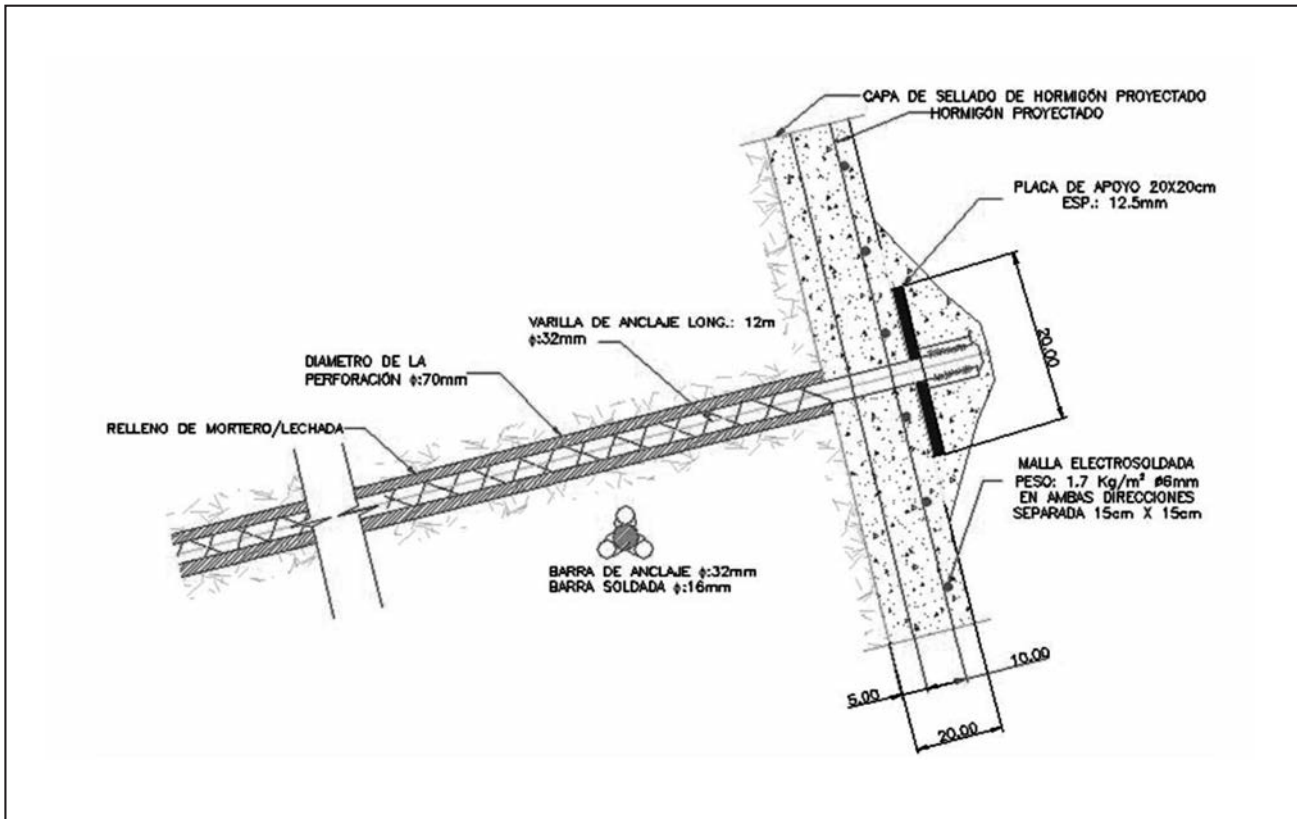


Figura 8. Detalle de los anclajes propuestos..

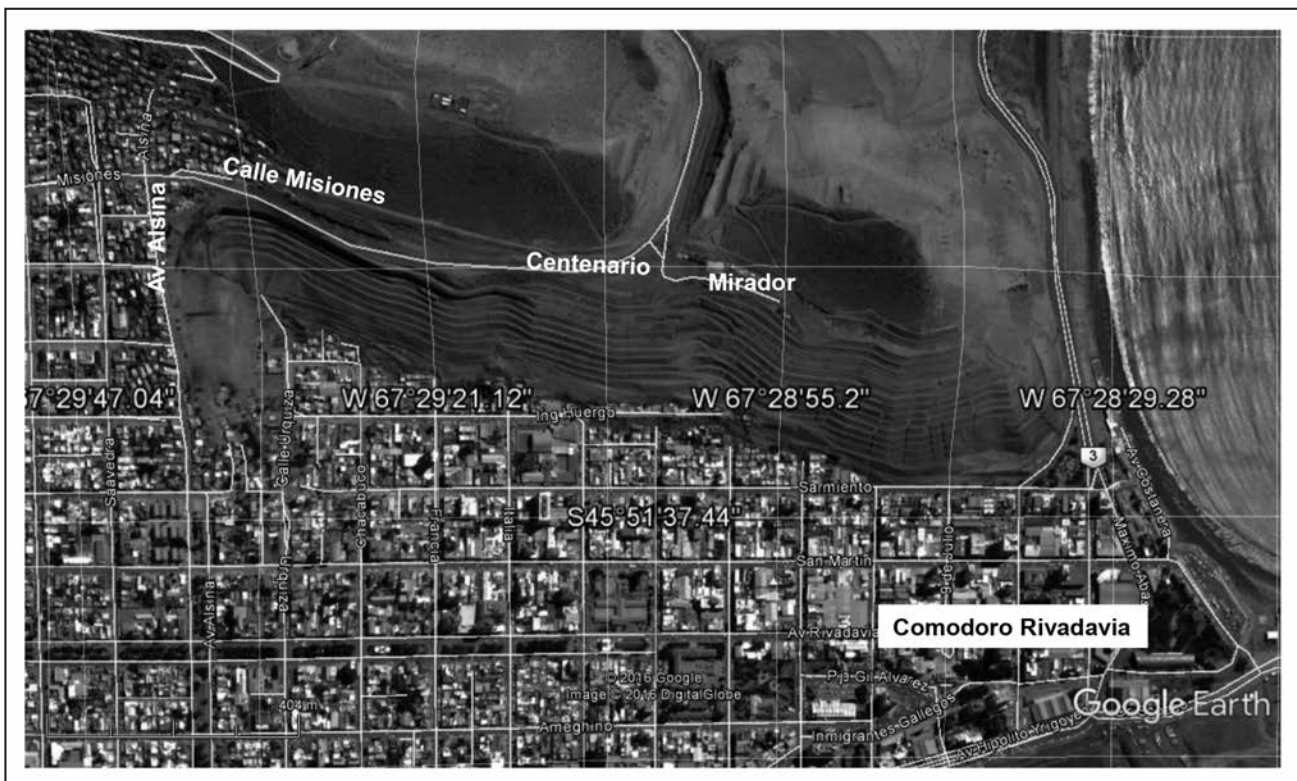


Figura 9. Vista del faldeo sur del cerro Chenque con los resultados de la intervención proyectada (imagen satelital capturada el 3 de octubre de 2016).

SÍNTESIS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un caso histórico de solución a problemas de inestabilidades de laderas que han venido ocurriendo en el cerro Chenque desde el siglo pasado. El trabajo consistió en analizar información geotécnica, geológica, geomorfológica, topográfica, hidrológica y de anteproyecto, con el objeto de desarrollar el proyecto ejecutivo para la estabilización del cerro. Se realizaron modelaciones numéricas de los taludes proyectados con el objeto de verificar la estabilidad global y local. El proyecto consistió en modificar el perfil natural de la ladera sur del cerro, diseñando aterrazamientos y protecciones con muros de hormigón proyectado y anclajes metálicos. Los resultados obtenidos permitieron diseñar los taludes con pendientes que eviten el desarrollo de fallas tanto del tipo planas como en cuña. En los sectores más comprometidos se debió proyectar muros de hormigón proyectado con anclajes pasivos para lograr la seguridad necesaria frente a posibles deslizamientos locales. Los factores de seguridad calculados para el escenario sin intervención resultaron en todos los casos menores a los recomendados. A modo de ejemplo, la intervención proyectada permitió mejorar la seguridad frente a posibles deslizamientos de un $FS = 1,195$ (menor a lo recomendado) hasta un $FS = 2,212$ luego de la intervención proyectada (Figura 5).

Los taludes propuestos tienen un ángulo medio de inclinación de 29° , y comprende bermas de 4,5 metros de ancho con taludes que poseen una pendiente 1:1,15 separadas cada 8,25 metros de altura. En los sectores más comprometidos donde debió colocarse muros de hormigón proyectado, los mismos presentaron una inclinación de 10° con respecto a la vertical, mientras que la inclinación de los anclajes adoptada fue de 25°

con respecto a la horizontal. Las soluciones propuestas permitieron lograr una geometría nueva para el faldeo con factores de seguridad frente a fallas locales y deslizamientos globales adecuados de acuerdo a lo recomendado en la práctica de la ingeniería geotécnica, tanto para verificaciones a largo plazo como a corto plazo. Todos los factores de seguridad frente a posibles fallas o deslizamientos con la geometría propuesta resultaron $FS > 1,5$. De igual modo, en las verificaciones de estabilidad local del sistema muro-anclaje en todos los casos los factores de seguridad también resultaron $FS > 1,5$.

El diseño de los anclajes incluyó además verificaciones del área de acero mecánica, para lo cual se mayoraron (aumentaron) las cargas de tracción obtenidas en el modelo de elementos finitos mediante un factor de 1,50 (lo cual supone anclajes permanentes). Se realizó además la verificación frente al deslizamiento de la barra de anclaje-bulbo, el arrancamiento del bulbo y la resistencia de la placa de apoyo del anclaje, verificando que la tensión de corte actuante sea menor a la tensión de corte admisible del acero. La Figura 8 muestra un detalle de la geometría propuesta para los anclajes, placa de apoyo y muro de hormigón proyectado.

Para que las soluciones proyectadas puedan materializarse se requiere de la protección de los taludes frente a posibles mecanismos de erosión por el escurrimiento superficial de agua de lluvia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia y Técnica de la Universidad Nacional de Córdoba y al CONICET.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ABRIL, E.G., 2010.

Consideraciones geotécnicas sobre el riesgo geológico en la ladera Sur del Co Chenque (Chubut).
Informe técnico inédito. Laboratorio de Geotecnia - Área Sensores Remotos. Universidad Nacional de Córdoba.

BARLETTA, R.H., CAPDEVILA, E.O., FLORES, R.M., GALAZZI G.A. Y MASSABIE, A.C. 2009.

Estabilidad de taludes del faldeo Sur del Cerro Chenque.
Informe Técnico IATASA.

BELLOSI, E.S., 1990.

Formación Chenque: registro de la transgresión patagónica en la Cuenca San Jorge.
Actas XI Congreso Geológico Argentino, Vol. 2: 57-60.

FERUGLIO, E., 1949.

Descripción Geológica de la Patagonia.
Dirección General de Yacimientos Petrolíferos Fiscales, 334 pp. Coni.

FRANCISCA F.M. Y RINALDI V.A., 1997.

Evaluación del Deslizamiento de un Talud Mediante Métodos no Destructivos,
XIII Congreso Anual de Ingenieros Geotécnicos Argentinos GT'97, Vol. 1: II.1/1-II.1/16.

FRENGUELLI, J., 1929.

Apuntes de geología patagónica. Descripción de algunos perfiles de la zona petrolífera de Comodoro Rivadavia.
Boletín de Informaciones Petroleras Vol. 59: 575-605.

GONZÁLEZ DÍAZ, E.F., 2004.

La extensa zona de deslizamientos de la escarpa oriental de la Pampa de Salamanca, Chubut, entre los $45^\circ 00' S$ y $45^\circ 45' S$.
Rev. Asoc. Geol. Argent. Vol. 59(4): 743-762.

HANSEN, J.B., 1970.

A revised and extended formula for bearing capacity,
Highway Capacity Manual Bulletin 28: 5-12.

HIRTZ, N., GRIZINIK M. Y BLACHAKIS, A., 2000.

Evaluación geohidrológica aplicada al desarrollo urbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina.
XI Congreso Brasileiro de Águas Subterráneas, Vol. 1: 1-17, San Pablo.

- HUNGR, O., LEROUÉIL, S. Y PICARELLI, L., 2014.
The Varnes classification of landslide types, an update.
Landslides, Vol. 11(2): 167-194.
- MEYERHOF, G.G., 1957.
The ultimate bearing capacity of foundations on slopes,
IV International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1: 384-386, London.
- PAREDES, J. Y COLOMBO, F., 2001.
Sedimentología de la Formación Chenque (Oligoceno-Mioceno) en Comodoro Rivadavia. Argentina.
Geogaceta, 30: 103-106.
- SCHILLIZZI, R., GELOS, E.M. Y SPAGNUOLO, J., 2004.
Procesos de retracción de los acantilados patagónicos entre la desembocadura de los ríos Negro y Chubut. Argentina.
Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología, 11(1): 17-26.
- SCIUTTO, J.C., CÉSARI, O. Y ESCRIBANO, V., 1999.
Hoja Geológica 4566-III. Comodoro Rivadavia, Provincia de Chubut.
Servicio Geológico Minero Argentino.
- SPENCER, E., 1967.
A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces.
Geotechnique, Vol. 18: 11-26.
- VARNES, D.J., 1978.
Slope movement types and processes.
Transportation Research Board Special Report No. 176.
- VESIC, A.S., 1975.
Bearing capacity of shallow foundations,
in Foundation Engineering Handbook, H.F. Winterkorn & H.Y. Fang (Eds.), Van Nostrand Reinhold, New York.