

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Mapas de fragilidad ambiental: concepto e método aplicados em estudo piloto

Biaggioni Quessada Gimenes, Filipe - Filho, Oswaldo Augusto

Modelo linear de mistura espectral na identificação de áreas degradadas por empréstimo de solo, Ilha Solteira - Brasil

de Lollo, José Augusto - Mansini Basso, Paloma - Suman Curti, Juliano

Influencia del tamaño de las partículas del agregado reactivo frente a los álcalis en las barras de mortero

Falcone, Darío D. - Coelho dos Santos, Gabriela S.

Influencia del agrietamiento en la resistencia al corte de una arcilla de alta plasticidad

Chávez Negrete, Carlos - Cervantes Navarro, David - Arreygue Rocha, Eleazar - Alarcón - Ibarra, Jorge

Utilização de geotecnologias para o zoneamento ambiental de bacias hidrográficas na região da serra da rapadura (Minas Gerais - Brasil)

Cerdeira Dias, Camila - Medeiros, Bruno Biaggioni Quessada Gimenes, Filipe - Amaral Faustino Magri, Rômulo

Retroceso costero y su relación con parámetros geotécnicos. Las Grutas, Río Negro

Kokot, Roberto R. - Salminci, José G. - Luna Fabio S. - Tunstall, Cynthia

Estimaciones, simulaciones y la influencia de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba

Rocca, R.J. - Terzariol, R.E. - Zeballos, M.E.

Caracterização geológica-geotécnica de solos argilosos do Vale do Ribeira para serem empregados como barreiras selantes

Rodriguez, Jaqueline Ruiz - Rodrigues, Valéria Guimarães Silvestre

Identificación de materiales asbestiformes en la ex usina General San Martín,

Ingeniero White (provincia de Buenos Aires)

Lescano, Leticia - Maiza, Pedro J. - Marfil, Silvina A.

Consecuencias de la configuración antrópica de la costa de la ciudad de Buenos Aires

López, Rubén A. - Marcomini, Silvia C.

Portada: Ruta Nacional N° 150 - San Juan, Argentina. Fotografía: Franco M. Francisca

Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente



**Revista de Geología
Aplicada a la Ingeniería
y al Ambiente**



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente

Publicación Oficial de



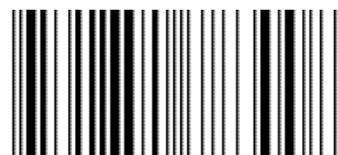
Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG
Ciudad Autónoma de Buenos Aires

editores@asagai.org.ar
www.asagai.org.ar

Tel/Fax (011)4322-2820

Número 30 • 2013

ISSN 1851-7838



En Homenaje
al Ingeniero
Alberto E. Rusculleda
(1946 - 2013)

Su calidez y bonhomía lo hacen inolvidable

DIRECTOR

MSc Geólogo Norberto Jorge Bejerman
Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba
Argentina
editores@asagai.org.ar

EDITOR ASOCIADO

Prof. Dr. José Chacón
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Granada
España
jchacon@ugr.es

COMITÉ EDITORIAL

Prof. Dr. Helder Iglésias Chaminé
Departamento de Engenharia Geotécnica
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Politécnico do Porto
Portugal
hic@isep.ipp.pt

Dr. Julio Luis del Río
Universidad Tecnológica Nacional
Unidad Académica Mar del Plata
Área Geoambiental
Argentina
julioluisdelrio@gmail.com

Prof. Dr. Luis I. González de Vallejo
Ingeniería Geológica
Departamento de Geodinámica
Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid
C./Antonio Novais nº 2; Madrid 28010
vallejo@geo.ucm.es

SECRETARÍA

Dr. Francisco Locati
CICTERRA (CONICET - UNC)
Argentina
flocati@efn.uncor.edu

PRODUCCIÓN EDITORIAL

Encargada de Diseño *Paula Paredes*
paulaparedes13@hotmail.com

Webmaster *Guillermo Saint*
saintdisegno@arnet.com.ar

Dra. Silvina A. Marfil
Departamento de Geología
Universidad Nacional del Sur
Comisión de Investigaciones Científicas
de la Prov. de Buenos Aires
Argentina
smarfil@uns.edu.ar

Dra. Graciela E. Tello
Universidad Nacional de la Patagonia Austral
Unidad Académica Río Turbio. Santa Cruz
Argentina
gtello28@yahoo.com

Dra. Ofelia Tujchneider
Grupo de Investigaciones Geohidrológicas
Departamento de Hidrología y Ambiente
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad nacional de El Litoral. Santa Fe
Argentina
pichy@fich1.unl.edu.ar

Geóloga Natalia Carina Szwedowicz
GEOs (CONCORD S.A.)
Argentina
nataliacarina-s@hotmail.com

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA

COMISIÓN DIRECTIVA 2010 - 2014

PRESIDENTE	<i>Norberto Jorge Bejerman</i>
VICEPRESIDENTE	<i>Fabio S. Luna</i>
SECRETARIO	<i>Rubén A. López</i>
TESORERO	<i>Adrián Angel Silva Busso</i>
VOCAL TITULAR	<i>Cristina Dapeña</i>
VOCAL TITULAR	<i>Mabel Mena</i>
VOCAL SUPLENTE	<i>Luis Mario Giaconi</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>José L. Guerrero</i>
REVISOR DE CUENTAS TITULAR	<i>Fernando Díaz</i>
REVISOR DE CUENTAS SUPLENTE	<i>Carlos Marconi</i>

Maipú 645, Piso 1° - C1006ACG - Ciudad Autónoma de Buenos Aires
asagai@asagai.org.ar
www.asagai.org.ar

INDICE

Trabajo	Autor/es	Pág
Staff		I
Comisión Directiva		II
Mapas de fragilidade ambiental: conceito e método aplicados em estudo piloto	<i>Biaggioni Quessada Gimenes, Filipe Filho, Oswaldo Augusto</i>	1
Modelo linear de mistura espectral na identificação de áreas degradadas por empréstimo de solo, Ilha Solteira - Brasil	<i>de Lollo, José Augusto Mansini Basso, Paloma Suman Curti, Juliano</i>	13
Influencia del tamaño de las partículas del agregado reactivo frente a los álcalis en las barras de mortero	<i>Falcone, Darío D. Coelho dos Santos, Gabriela S.</i>	23
Influencia del agrietamiento en la resistencia al corte de una arcilla de alta plasticidad	<i>Chávez Negrete, Carlos Cervantes Navarro, David Arreygue Rocha, Eleazar Alarcón Ibarra, Jorge</i>	31
Utilização de geotecnologias para o zoneamento ambiental de bacias hidrográficas na região da serra da rapadura (Minas Gerais - Brasil)	<i>Cerdeira Dias, Camila - Medeiros, Bruno Biaggioni Quessada Gimenes, Filipe Amaral Faustino Magri, Rômulo</i>	39
Retroceso costero y su relación con parámetros geotécnicos. Las Grutas, Río Negro	<i>Kokot, Roberto R. - Salminci, José G. Luna Fabio S. - Tunstall, Cynthia</i>	53
Estimaciones, simulaciones y la influencia de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba	<i>Rocca, R.J. - Terzariol, R.E. Zeballos, M.E.</i>	67
Caracterização geológica-geotécnica de solos argilosos do Vale do Ribeira para serem empregados como barreiras selantes	<i>Rodriguez, Jaqueline Ruiz Rodrigues, Valéria Guimarães Silvestre</i>	77
Identificación de materiales asbestiformes en la ex usina General San Martín, Ingeniero White (provincia de Buenos Aires)	<i>Lescano, Leticia - Maiza, Pedro J. Marfil, Silvina A.</i>	87
Consecuencias de la configuración antrópica de la costa de la ciudad de Buenos Aires	<i>López, Rubén A. - Marcomini, Silvia C.</i>	101
Instrucciones para autores		113
Formulario de suscripción o compra		117

MISIÓN Y OBJETIVOS DE LA PUBLICACIÓN

Misión y objetivos de la publicación

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* es la publicación oficial en Argentina de la asociación miembro de la *International Association of Engineering Geology and the Environment*. La *Geología Aplicada a la Ingeniería* se define, en los estatutos de la IAEG, como "la ciencia dedicada a la investigación, estudio y solución de los problemas ambientales e ingenieriles que correspondan como resultado de la interacción entre la geología y las obras y actividades del ser humano, así como de la predicción y del desarrollo de medidas previsoras o de corrección de los peligros geológicos". La *Geología Aplicada a la Ingeniería* comprende: "la definición de la geomorfología, estructura, estratigrafía, litología y los acuíferos de las formaciones geológicas, las propiedades químicas e hidráulicas de todos los materiales involucrados en la construcción, extracción de recursos y cambio ambiental; la valoración del comportamiento hidrológico y mecánico de los suelos y macizos rocosos; la predicción de los cambios de las anteriores propiedades con el tiempo; la determinación de los parámetros a tener en cuenta en el análisis de estabilidad de las obras de ingeniería y de los terrenos; el mantenimiento y mejora de la condición ambiental del terreno"

La *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente* tiene por objeto fomentar la publicación y difusión de artículos originales de calidad en todos los ámbitos propios, así como la difusión de noticias sobre eventos y publicaciones de interés en la temática. Está dirigida a científicos y profesionales geólogos, ingenieros y tecnólogos.

En todos los casos, las opiniones vertidas en esta publicación son responsabilidad de los autores y no reflejan posiciones oficiales de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería. Todos los artículos son sometidos a un proceso de revisión por pares a cargo de especialistas de reconocido prestigio que colaboran, a tal fin, voluntariamente y sin lucro alguno, con la Revista.

Leyenda de protección de derechos de autor

Todos los artículos publicados en esta Revista cuentan con protección de los derechos de autor. Ninguna parte del material publicado aquí podrá ser reproducido, transmitido, almacenado o utilizado en ninguna forma o por cualquier medio gráfico, electrónico, o mecánico, incluyendo, pero no limitándose a, el fotocopiado, grabación, escaneo, digitalización, grabación en cinta, distribución en la Web, redes de información, o sistemas de almacenamiento y recuperación, sin permiso previamente aceptado del Editor.

El autor podrá incluir una versión del artículo en su propio sitio Web o en el de su institución. Los Autores podrán reproducir el Artículo, total o parcialmente, y difundir su contenido o ponerlo a disposición del público, en formato impreso o electrónico, como parte de un contenido docente o como una recopilación, para su uso en el ámbito académico o de investigación en la institución a la que pertenezcan, citando que fue publicado en la revista.

Precio de la revista

Quienes estén interesados en adquirir un ejemplar de la Revista, cuyo costo es de 280 pesos, deberán contactarse con la Editorial (editores@asagai.org.ar).

En la página 117 encontrará el formulario a completar a tal efecto

Aims and objectives

*The Journal of Engineering Geology and the Environment is the official publication in Argentina of the corresponding association of the **International Association of Engineering Geology and the Environment**. "Engineering geology, is defined in the statutes of the IAEG as the science devoted to the investigation, study and solution of engineering and environmental problems which may arise as the result of the interaction between geology and the works or activities of man, as well as of the prediction of and development of measures for the prevention or remediation of geological hazards. Engineering geology embraces: the definition of the geomorphology, structure, stratigraphy, lithology and ground water conditions of geological formations; the characterisation of the mineralogical, physico-geomechanical, chemical and hydraulic properties of all earth materials involved in construction, resource recovery and environmental change; the assessment of the mechanical and hydrological behaviour of soil and rock masses; the prediction of changes to the above properties with time; the determination of the parameters to be considered in the stability analysis of engineering works and earth masses; the improvement and maintenance of the environmental condition and properties of the terrain".*

The aims of this journal are the publication and diffusion of original quality paper in all related fields and also the diffusion of news about related events and publications of interest. It is addressed to scientist and professional geologists, engineers and technologists.

In any case, the opinions expressed in this publication are responsibility of the authors and do not reflect official positions of the Argentina Association of Engineering Geology. All items are submitted to a peer review process by renowned specialists who collaborate to that end, voluntarily and without any profit, with the Journal.

Authors Copyrights

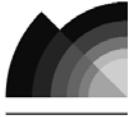
All papers published in this Journal are protected by copyrights. No part of published material covered herein may be reproduced, transmitted, stored, or used in any form or by any means graphic, electronic, or mechanical, including but not limited to photocopying, recording, scanning, digitizing, taping, Web distribution, information networks, or information storage and retrieval systems, without a previously accepted permission by the Editor.

The author(s) will be allowed to include a paper version in his own or institutional Web site. The author(s) may reproduce the paper, totally or partially, and diffuse it contain or let it available to the public in impressed or electronic format only as a part of a teaching context or as a state-of-the art reviewing, for it use in a academic context or for researches in their institution, by citing its previous publication in this Journal.

Price of the Journal

All interested in buying a copy of any Journal issue, with the actual cost of ARS 280, should be in contact with the Editor (editores@asagai.org.ar).

In page 117 an application form to be fulfilled and sent to the Editor is available.



Mapas de fragilidade ambiental: conceito e método aplicados em estudo piloto

Environmental fragility maps: concept and method applied in a pilot study

Biaggioni Quessada Gimenes, Filipe¹ ✉ - Filho, Oswaldo Augusto¹

Recibido: 12 de Julio de 2012 • Aceptado: 10 de Marzo de 2013

Resumen

Este trabajo aborda aspectos relacionados a la definición de conceptos de fragilidad ambiental, y presenta un método para evaluar los niveles de fragilidad ambiental. El método presentado también es aplicado en un estudio piloto para ilustrar los resultados que se pueden obtener. Los análisis fueron desarrollados para una parte del oleoducto San Paulo – Brasilia (OSBRA), usando un mapa topográfico en escala 1:10.000. Todos los análisis fueron realizados en Sistema de Información Geográfica (SIG) y fue utilizado el método de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) para realizar las ponderaciones. Los principales resultados permiten esclarecer el concepto de fragilidad ambiental y muestran la importancia de la definición y la ponderación de atributos utilizados en los métodos. Además el mapa final generado permite evaluar la sensibilidad del método aplicado.

Palabras Clave: *Fragilidad Ambiental; Sistema de Información Geográfica (SIG); Proceso de Análisis Jerárquico (AHP).*

Resumo

Este trabalho aborda aspectos relacionados à definição do conceito de fragilidade ambiental, e apresenta um método para avaliar os níveis da fragilidade ambiental. O método apresentado também é aplicado em um estudo piloto para ilustrar os resultados que podem ser obtidos. As análises foram desenvolvidas em um trecho do Oleoduto São Paulo – Brasília (OSBRA), utilizando mapa topográfico na escala 1:10.000. Todas as análises foram realizadas em um programa de Sistema de Informação Geográfica (SIG) e foi utilizado o método de Processo de Análise Hierárquico (AHP), para realização das ponderações. Os principais resultados permitem esclarecer o conceito de fragilidade ambiental e mostrar a importância da definição e ponderação dos atributos utilizados nos métodos.

1. Escola de Engenharia de São Carlos - USP (Brasil)

✉ fbiaggioni@gmail.com

Além disso, o mapa final gerado permite avaliar a sensibilidade do método.

Palavras chave: *Fragilidade Ambiental; Sistema de Informação Geográfica (SIG); Processo de Análise Hierárquico (AHP).*

Abstract

This work addresses aspects related to the definition of the environmental fragility concept, and proposes a method to evaluate the levels of environmental fragility. The proposed method is also applied in a pilot study to show the results that may be obtained. The analysis were developed in a sector of the São Paulo - Brasília oil pipeline (OSBRA), using digital topographic map at the scale of 1:10,000. A Geographical Information System (GIS) software was used to perform the analysis and it was used the Analytic Hierarchy Process (AHP) method to assign the weights. The obtained results elucidate the environmental fragility concept and show the importance of the weight assignment and selection of the attributes used in the method. Besides, the final map provided to evaluate the method sensitivity.

Keywords: *Environmental Fragility; Geographical Information System (GIS); Analytic Hierarchy Process (AHP).*

INTRODUÇÃO

A ocorrência de processos geológicos está relacionada à dinâmica natural do planeta, independente da interferência humana. Contudo, devido à ação antrópica intensa esses processos se tornaram muito mais frequentes, podendo ser potencializados pelo uso e ocupação inadequados do solo. Por esse motivo, se faz necessário o uso de ferramentas que auxiliem a descrição e caracterização dos processos geológicos naturais e também dos antrópicos.

Especialmente em relação aos oleodutos, há possibilidade de ocorrência de eventos perigosos de origem geológico-geotécnica, decorrentes da interação entre os dutos e o terreno. As tensões resultantes da interação (compressão, tração e cisalhamento) podem levar à ruptura dos dutos. Podem também ocorrer vazamentos relacionados ao processo corrosivo do solo. Além disso, a ação antrópica, traduzida pelo uso e ocupação inadequados, pode intensificar a ocorrência desses eventos (Augusto Filho, 2008).

Um conceito que vem sendo utilizado, relativamente há pouco tempo no Brasil, em estudos dos processos geológicos naturais e antrópicos é o de fragilidade ambiental. Este conceito tem sido utilizado especialmente em estudos para melhorar a gestão ambiental e geotécnica de oleodutos. Contudo, o conceito é utilizado por diferentes autores com diferentes definições, o que pode tornar sua aplicação confusa.

O mapa de fragilidade ambiental consiste no zoneamento do território em diferentes níveis hierárquicos, que representam os diferentes graus de fragilidade. Permite definir quais áreas são mais frágeis e podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente. Tem grande potencial para ser utilizado em estudos de impacto ambiental.

Mesmo com os constantes avanços nos sistemas de segurança operacional, sejam eles relativos à exploração ou ao transporte de petróleo e derivados, a ocorrência de acidentes nesse ramo de atividade ainda é muito frequente (Noernberg; Lana, 2002). Uma análise da frequência anual de acidentes em oleodutos localizados no estado de São Paulo, em um período de 26 anos, indica um aumento entre 1982 e 1999, principalmente entre os anos de 1996 e 1999, após os quais ocorre uma queda (Augusto Filho et al., 2010).

Por esses motivos, acidentes em oleodutos se constituem em importante ameaça para a qualidade ambiental tanto de re-

giões costeiras, como também de regiões interioranas. E são necessários estudos que permitam melhor gestão de áreas em que se pretende implantar ou que já esteja implantado este tipo de empreendimento. Neste contexto, os estudos de fragilidade ambiental constituem boa ferramenta para realizar tal tarefa.

O presente artigo se relaciona a uma pesquisa de mestrado em andamento, que se intitula "Mapa de Fragilidade Ambiental: Conceituação e Aplicação em um setor do Oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA)". Nesta pesquisa foi feito um levantamento sistemático a cerca do conceito de fragilidade ambiental, bem como dos métodos de avaliação dos níveis de fragilidade ambiental, a fim de permitir sua aplicação em um trecho do oleoduto OSBRA.

O objetivo deste trabalho é abordar aspectos relacionados à definição do conceito de fragilidade ambiental, além de apresentar o método para avaliar os níveis da fragilidade ambiental. Todas as análises foram realizadas em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Foi utilizado o método de Processo Analítico Hierárquico (AHP), proposto por Saaty (1980), visando reduzir a subjetividade das análises.

Destaca-se que a aplicação do método apresentado foi realizada em um estudo piloto, na medida em que a área de estudo (oleoduto) apresenta uma dimensão relativamente reduzida. Dessa forma, o estudo piloto tem como principal função ilustrar a aplicação do método, pois é pouco representativo em relação a sua extensão.

É importante ressaltar que existem diferentes métodos de mapeamento cartográfico, com diferentes terminologias associadas a eles. Dessa forma, neste trabalho foi feita uma escolha em relação aos termos utilizados em cartografia de carta e mapa. Os produtos cartográficos gerados neste trabalho receberam a denominação de Mapa, de acordo com a classificação de Mathewson e Font (1974). Os documentos de outros autores, citados no trabalho, receberam o nome original da publicação.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Longitude 48°W, Latitude 22°S) compreende 205,8 km² e abrange 48,5 km de extensão e uma zona de amplitude de 2 km de cada lado do oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA), no trecho entre os municípios de São Simão e Ribeirão Preto, no estado de São Paulo (Figura 1).

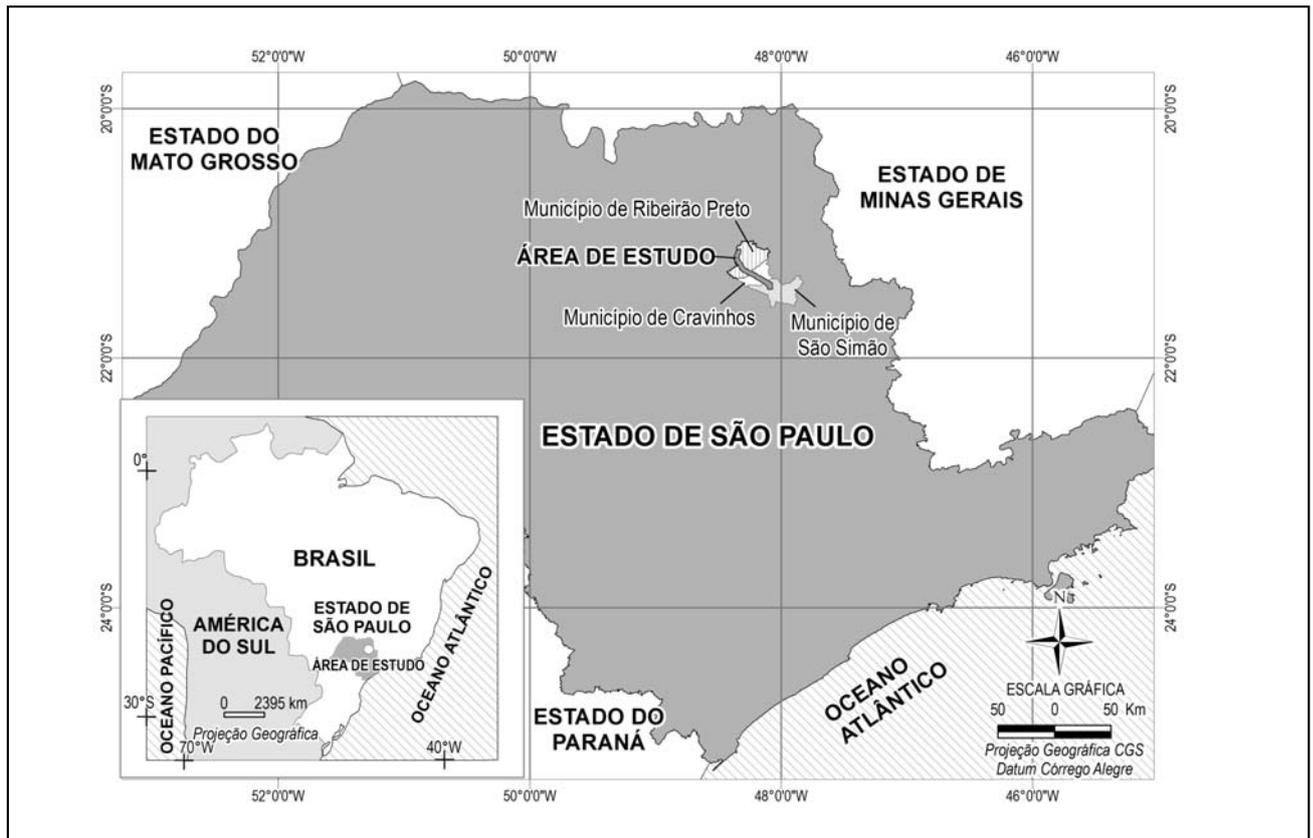


Figura 1. Localização da área de estudo.

A topografia da área de estudo é composta por colinas planas (< 200 m) com declividade moderada (3 - 7°), a elevação predominante do terreno encontra-se em uma faixa entre 620,5 e 785,5m, conforme pode ser observado na Figura 2, que mostra um recorte (representativo da área de estudo) do Modelo Digital do Terreno (MDT).

A geologia local consiste em arenitos eólicos com estratificação cruzada da Formação Botucatu e intrusões diabásicas da Formação Serra Geral, ambas do Período Jurássico-Cretáceo, sobrepostos por depósitos aluviais e coluviais Cenozóicos.

Quanto aos materiais inconsolidados existentes na área encontram-se Depósitos Aluvionares, Coberturas Arenosas, Solos Residuais de Basalto, Solos Residuais de Arenito Botucatu e Solos Residuais de Arenito Intertrapiano.

A área de estudo está contida em uma importante bacia hidrográfica do estado de São Paulo, a Bacia do Rio Pardo. Entretanto, o oleoduto pode ser isolado do Aquífero Guarani, um dos maiores armazenadores de água do mundo. A pluviosidade média da região é de 1350 mm/ano. Sendo a estação chuvosa entre Outubro e Março, quando as temperaturas médias variam entre 22 e 26 °C.

No período seco (entre Abril e Setembro), as temperaturas médias variam entre 13 e 16 °C (Augusto Filho et al., 2010).

Em relação aos tipos de uso existentes verifica-se a predominância de plantações de cana de açúcar, além disso, encontram-se também áreas de mata, reflorestamento, campo sujo, pastagem, culturas anuais e perenes, solo exposto, vias, linhas de transmissão, áreas urbanas, áreas industriais, propriedades rurais e loteamentos.

O oleoduto OSBRA é feito de tubos de aço corrugado, de diâmetro nominal de 5,04 m. O seguimento de oleoduto que será estudado foi construído entre 1998 e 1999 utilizando, principalmente, trincheiras abertas, com profundidades entre 1,5 - 2 m, e os dutos foram subsequentemente cobertos com preenchimento compactado.

Como a área de estudo total apresentava regiões muito homogêneas em relação a todos os atributos analisados nesta pesquisa, após terem sido realizados alguns ensaios piloto na área toda, reduziu-se a área de estudo para, aproximadamente, 40% da total, com 18 km de extensão.

Esta área final engloba todos os tipos de usos e também todos os materiais inconsolidados, desta forma, garante-se que será possível verificar a sensibilidade do método para as diferentes características da área. O recorte final da área de estudo é mostrado na Figura 3.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A palavra fragilidade provém do latim *fragilitatis* e é definida como caráter daquilo que é frágil, sendo frágil o que se pode danificar ou deteriorar facilmente, ou ainda, aquilo que é vulnerável (Larousse Cultural, 1998).

Pela própria definição do dicionário já é possível perceber que o conceito de fragilidade remete ao de vulnerabilidade, o que já indica que é possível que os termos se confundam. Por este motivo, buscaram-se na literatura científica definições e aplicações do conceito de fragilidade ambiental de forma esclarecer o real significado do conceito.

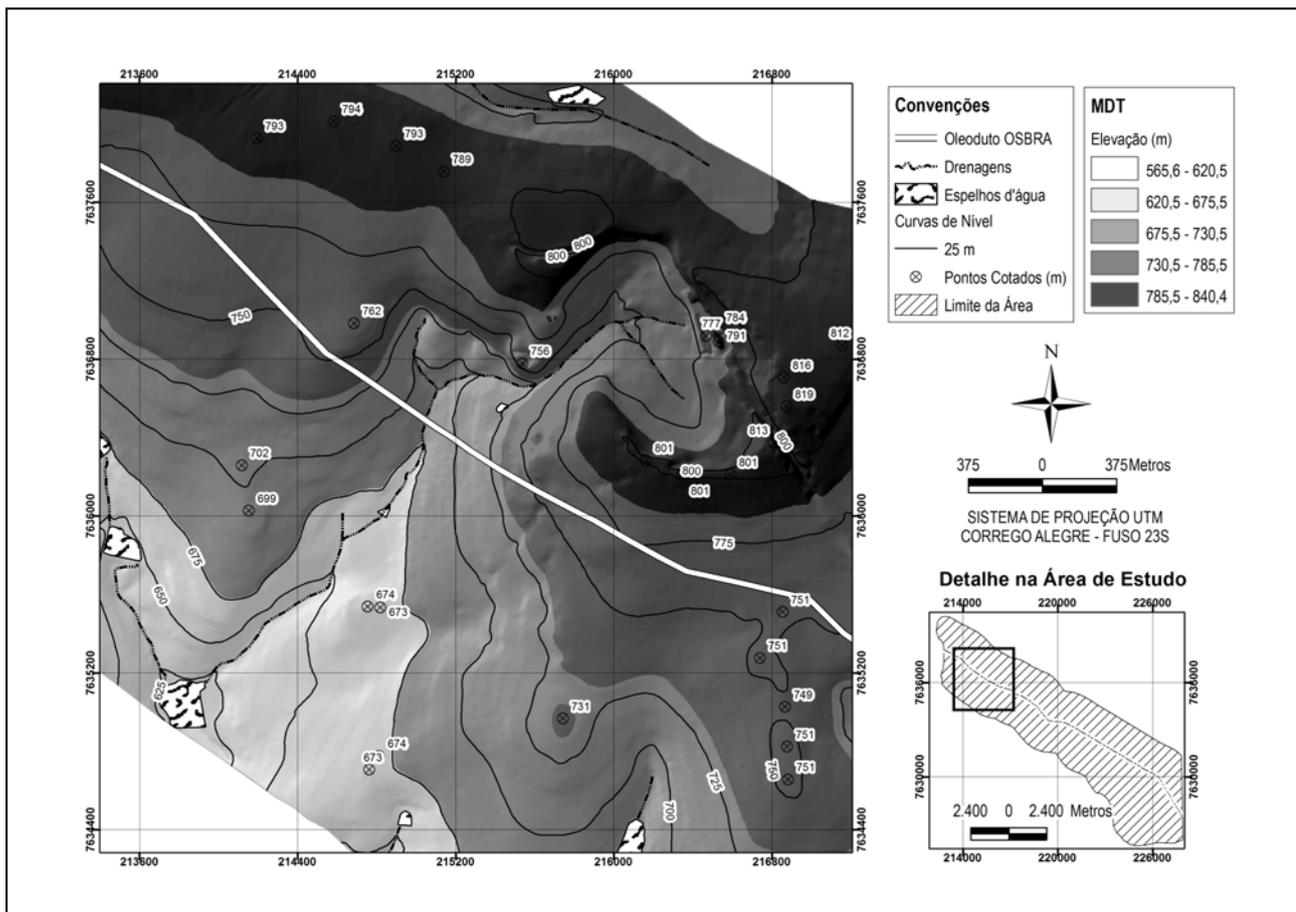


Figura 2: Recorte do Modelo Digital do Terreno (MDT).

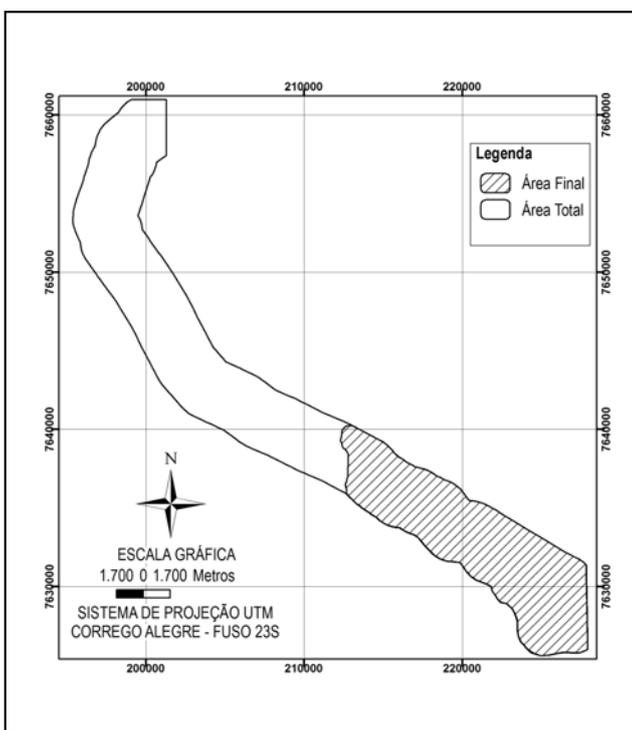


Figura 3. Representação da área de estudo final.

Ratcliffe (1971) descreve fragilidade como uma medida da sensibilidade intrínseca de um ecossistema às pressões ambientais (especialmente mudanças de gestão), combinada com a exposição à ameaça que poderia perturbar o equilíbrio existente. Este conceito foi utilizado no contexto de seleção de reservas naturais.

De acordo com Ratcliffe (1977), a fragilidade ecológica reflete o grau de sensibilidade de um habitat às mudanças ambientais e, conseqüentemente, representa a combinação de fatores internos e externos. A fragilidade ecológica está relacionada com a ocorrência de eventos que podem potencialmente determinar modificações desfavoráveis no habitat. Particularmente, a fragilidade ecológica de um habitat é determinada pela combinação da sensibilidade ecológica e o real nível de eventos desfavoráveis nele.

Ainda no contexto de seleção de reservas naturais, Smith e Theberge (1986) definem fragilidade como o oposto à estabilidade, sendo estabilidade a velocidade com que um sistema retorna ao equilíbrio após uma perturbação. Os autores ainda destacam que a fragilidade pode ser natural ou induzida pelo ser humano e que a natural pode ser devida a fatores internos ou externos.

Estas definições consideram fragilidade como a desestabilização de um ecossistema, dada uma perturbação, que pode ser natural (intrínseca ou extrínseca) ou antrópica. E que para ser avaliada deve ser identificada a perturbação em questão e os

principais atributos que poderão ser afetados, tanto bióticos (fauna, flora) como abióticos (solo, recursos hídricos, etc.), dependendo do caso.

Goldsmith (1983) define uma área frágil como uma área com elevada sensibilidade inerente, como uma área alagada, uma duna costeira e regiões montanhosas, que são potencialmente fisicamente instáveis.

É feita ainda a distinção entre fragilidade e vulnerabilidade, assumindo que uma área é inerentemente frágil, mas é vulnerável a uma ameaça externa como mudança no uso do solo, por exemplo (*Goldsmith, op. cit.*).

De acordo com a definição deste autor, fragilidade é aquela devida apenas a fatores intrínsecos e esta fragilidade associada a perturbações provocadas por ações antrópicas é a vulnerabilidade do ambiente.

No Brasil, *Ross (1994)* introduziu o conceito de fragilidade ambiental em seu estudo intitulado *Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados*. O autor afirma que a fragilidade dos ambientes naturais, dada uma intervenção antrópica, depende de suas características genéticas. A princípio, os ambientes naturais se encontravam em equilíbrio dinâmico até o início progressivo das intervenções humanas na exploração de recursos naturais.

Ross (op. cit.) baseou-se no conceito de Unidades Ecodinâmicas preconizado por *Tricart (1977)* para avaliar as fragilidades dos ambientes naturais. Definiu as Unidades Ecodinâmicas Instáveis (Instabilidade Emergente) como sendo aquelas cujas intervenções antrópicas modificaram intensamente os ambientes naturais, enquanto as Unidades Ecodinâmicas Estáveis (Instabilidade Potencial) são as que estão em equilíbrio dinâmico e foram poupadas da ação humana, encontrando-se em seu estado natural.

De acordo com *Ross (op. cit.)*, a carta de fragilidade potencial indica os graus de fragilidade, sob a ação dos processos morfogênicos atuantes na paisagem, resultantes da correlação de alguns dos componentes físico-naturais da paisagem: declividade do terreno, índice de dissecação do relevo e cobertura pedológica. E a carta de fragilidade emergente correlaciona as informações resultantes da fragilidade potencial com as informações de uso do solo, indicando os graus de fragilidade das unidades espaciais conforme a proteção do solo.

Percebe-se que há uma confusão geral dos termos relacionados à fragilidade ambiental, tanto internacionalmente quanto nacionalmente. Muitas vezes os termos são considerados sinônimos, o que pode ser entendido, uma vez que as próprias definições do dicionário são muito similares. Na maioria dos casos em que se procura diferenciar esses termos, os autores acabam sendo incoerentes com as definições. Um exemplo é denominar de fragilidade ambiental algo que considera apenas os aspectos físicos do meio ambiente.

Além disso, o que se verifica é que os primeiros registros de definição e utilização do conceito de fragilidade ambiental são contemporâneos à época em que os outros termos mais bem difundidos atualmente (susceptibilidade, vulnerabilidade, etc.) estavam se consolidando. Ao que tudo indica, é que ao decorrer do tempo, o conceito de fragilidade ambiental acabou sendo pouco utilizado e não se consolidou como os outros.

Observando as primeiras definições para o termo fragilidade encontradas na literatura científica internacional verifica-se um consenso que a fragilidade de um ambiente se traduz pela

desestabilização de um equilíbrio dinâmico preexistente. As divergências das diferentes definições se encontram nos fatores que causam este desequilíbrio.

Alguns autores consideram que a fragilidade é devida a fatores internos e externos, enquanto outros consideram que é apenas devido a fatores internos, sendo uma propriedade intrínseca do sistema.

MÉTODO

O método adotado no presente trabalho consiste basicamente nas seguintes etapas:

- Planejamento: nesta etapa foi feita a definição dos objetivos da pesquisa, bem como realizada uma pesquisa bibliográfica preliminar e foram estabelecidas as principais atividades a serem executadas;
- Revisão Bibliográfica: foi realizada a revisão bibliográfica sistemática sobre os temas técnico-científicos principais abordados pelo estudo, a fim de possibilitar embasamento teórico para aplicação do método;
- Aplicação do método: o método foi aplicado utilizando apenas dois mapas intermediários e o método de Processo de Análise Hierárquica (AHP), permitindo ilustrar o procedimento de geração do Mapa de Fragilidade Ambiental;
- Análise dos resultados: após aplicação do método, os resultados obtidos foram avaliados em função do se esperava;
- Conclusões: com os resultados avaliados foi possível elaborar as conclusões, evidenciando a relevância de estudos de fragilidade ambiental, bem como mostrando a sensibilidade do método adotado.

O método para análise da fragilidade ambiental foi desenvolvido pautado pelo conceito adotado como correto. Portanto, analisou-se a fragilidade ambiental considerando apenas fatores intrínsecos ao meio ambiente, e buscando, na medida do possível, englobar aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico.

Foi utilizada uma abordagem dedutiva, partindo do mais geral para o mais específico. Portanto, para gerar o Mapa de Fragilidade Ambiental são necessários mapas de susceptibilidade intermediários que avaliam a susceptibilidade da área para os diferentes processos físicos que possam ocorrer (endógenos e exógenos) e também mapas de susceptibilidade dos elementos bióticos e socioeconômicos existentes.

A princípio foram elencados todos os processos possíveis de ocorrer no meio ambiente, porém alguns deles foram descartados por não ocorrerem na área de estudo, perdendo o sentido de analisá-los. Um exemplo é o processo endógeno de sismos, que não se aplica na área.

Logo, os mapas utilizados para a área de estudo foram os seguintes: Susceptibilidade à Erosão, Susceptibilidade à Movimentos de Massa, Susceptibilidade à Corrosividade, Susceptibilidade ao Escoamento Superficial, Susceptibilidade a Eventos Climáticos Intensos, Susceptibilidade à Colapsividade e Susceptibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos.

Após terem sido definidos os mapas de susceptibilidade intermediários a serem utilizados para a área de estudo, foram definidos os atributos que deveriam ser analisados. Esses atributos foram definidos adaptando-se o método proposto por

Zuquette (1987). Em relação aos atributos do mapa de suscetibilidade dos elementos bióticos e socioeconômicos, estes foram definidos a partir do mapa de uso e ocupação, considerando as diferentes ocupações humanas, atividades econômicas desenvolvidas e a presença de áreas naturais existentes ou legalmente protegidas.

Finalmente, foram definidas as classes dos atributos previamente definidos. Alguns atributos já tinham suas classes previamente definidas (limitadas pela ocorrência na área) como é o caso da concavidade, materiais inconsolidados, uso, além de alguns valores numéricos como área da bacia, por exemplo.

As classes de declividade para erosão foram definidas baseadas no método de capacidade de uso do solo e as para movimentos de massa nas classes discutidas por Augusto Filho (2001). As classes de declividade para escoamento superficial foram adaptadas do proposto pela Embrapa (1979), ainda para o escoamento superficial as classes de tipo de solo foram agrupadas e classificadas de acordo o método proposto pelo Serviço de Conservação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS-USDA).

As faixas de variação de nível d'água foram agrupadas em cinco considerando-se níveis raso, médio e profundo, com classes intermediárias entre raso e médio e médio e profundo. Os valores de eventos climáticos intensos foram extraídos do banco de dados digital disponível no Sistema de Informações para o Gerenciamento de recursos Hídricos do Estado de São Paulo - SigRH (2012).

Para facilitar a visualização foram elaborados fluxogramas para cada mapa a ser gerado com seus diferentes atributos e respectivas classes, que serão apresentados nos resultados.

Uma vez definidos os atributos e classes de atributos a serem analisados foi necessário atribuir pesos a cada um deles. O método selecionado para realizar tal tarefa foi o Método de Processo de Análise Hierárquica (AHP), pois ao utilizá-lo se garante consistência em todas as ponderações realizadas.

Portanto, foram elaboradas matrizes para cada mapa a ser gerado correlacionando de forma pareada os atributos e as classes de atributo, de forma a permitir a análise da importância relativa de cada um dos fatores e obter os pesos finais.

Estes pesos finais foram então atribuídos a cada classe de atributo, no software ArcGIS 9.3, em uma tabela de atributos para ser possível realizar operações matemáticas para sobreposição dos fatores de interesse para cada mapa intermediário. O método matemático utilizado para realizar a sobreposição foi o de soma ponderada, discutido por Soares (2006).

As operações de soma ponderada foram realizadas com a ferramenta Single Output Map Algebra (disponível no software ArcGIS 9.3) para geração de cada mapa intermediário. As notas finais obtidas foram agrupadas em cinco classes (Muito baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta) e foi utilizado o método de classificação *Natural Breaks*.

Com os mapas intermediários gerados foi possível obter o Mapa de Fragilidade Ambiental pela sobreposição destes mapas com uma operação de soma simples. Adicionalmente, podem-se realizar diferentes combinações de mapas intermediários para verificar-se a sensibilidade da área de estudo aos diferentes fatores de análise.

RESULTADOS DISCUSSÃO

Neste artigo, além dos resultados a cerca do conceito e método para avaliar a fragilidade ambiental, são apresentados os resultados do ensaio piloto obtidos combinando dois dos mapas intermediários, o de Suscetibilidade à Erosão e o de Suscetibilidade dos Fatores Bióticos e Socioeconômicos.

Conceito de Fragilidade Ambiental

Tendo em vista tudo o que foi apresentado no item de fundamentação teórica, o presente trabalho adota como definição de fragilidade ambiental a desestabilização do equilíbrio dinâmico existente no ambiente, e que esta é uma característica intrínseca do meio ambiente. Para ilustrar a definição defendida neste trabalho adaptou-se um gráfico apresentado por Rossi (2001), mostrado na Figura 4.

De acordo com o gráfico, a fragilidade ambiental, que é representada pela inclinação da reta (α), representa uma característica intrínseca de um sistema. Os diferentes índices de α (1, 2 ou 3) representam sistemas diferentes, com fragilidade ambiental diferente. Tal conceito pode ser quantificado pelas características naturais dos sistemas (bióticas, abióticas e socioeconômicas).

A fragilidade ambiental será sempre a mesma para um dado sistema. Quando o sistema for afetado por fatores extrínsecos, representados pela interferência (na maioria das vezes antrópica), resultará em respostas diferentes, em função da fragilidade ambiental deste sistema. Esta resposta é traduzida pela alteração ambiental.

Seguindo esta definição, este trabalho considera que a fragilidade ambiental é equivalente ao conceito de vulnerabilidade, utilizado na análise de risco. Desta forma, quando se avaliarem as características naturais do meio, estará se avaliando a fragilidade ambiental. E quando se relacionar este resultado com informações da pressão antrópica, estarão sendo avaliadas as possíveis alterações ambientais que poderão ocorrer.

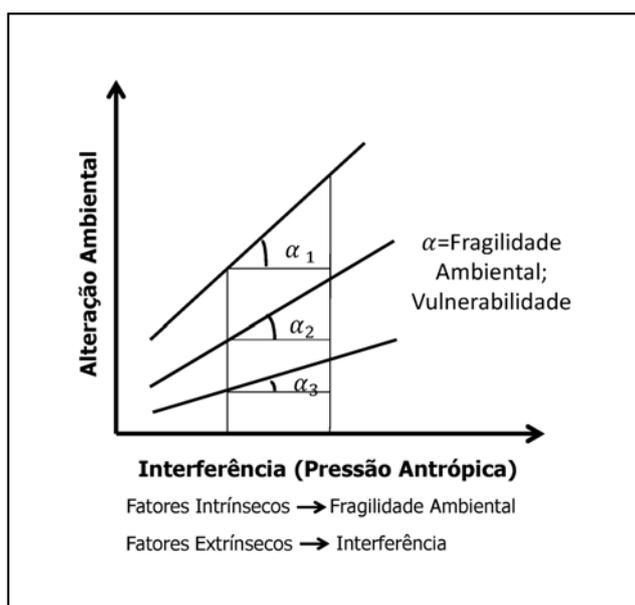


Figura 4. Modelo conceitual adotado de fragilidade ambiental. Adaptado de Rossi (2001).

Método de Análise dos Níveis de Fragilidade Ambiental

Como citado anteriormente, neste artigo são apresentados os resultados referentes à aplicação do método combinando apenas dois dos mapas intermediários: erosão e fatores bióticos e socioeconômicos.

Dessa forma, tão importante quanto os produtos cartográficos finais são os atributos utilizados no processo de geração dos mesmos. Portanto, na Figura 5 são mostrados os atributos que devem ser utilizados para confecção dos mapas de suscetibilidade à erosão e de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos.

Em relação aos atributos utilizados para elaboração do mapa de suscetibilidade à erosão, verifica-se que foram selecionados quatro que foram considerados como os mais importantes para esta análise. E as classes de atributos foram agrupadas visando manter no mesmo grupo as classes que apresentassem potencial de escoamento/infiltração semelhantes.

De fato, quando se verifica o resultado obtido percebe-se que o mapa se mostra coerente com aquilo que era esperado. Portanto, nota-se a importância da seleção dos atributos,

de forma que mesmo que não sejam utilizados todos os possíveis é importante selecionar os mais representativos para gerar resultados próximos da realidade.

Já o atributo e suas classes referentes ao mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos foram selecionados visando traduzir a importância dos elementos naturais existentes, bem como da ocupação antrópica e suas atividades desenvolvidas. Por isso, as classes de uso foram divididas separando áreas naturais existentes, legalmente protegidas, áreas de ocupação humana e também as áreas onde são desenvolvidas atividades econômicas.

Da mesma forma, a atribuição de pesos para os atributos e as classes de atributos é de vital importância para a qualidade final dos mapas gerados. Por isso, se faz necessário apresentar a estruturação das matrizes de ponderação do Método AHP, bem como os resultados de pesos finais obtidos. As ponderações foram realizadas pelos autores do trabalho.

Nas Tabelas 1 e 2 são apresentadas as comparações paritárias, bem como os resultados obtidos (autovetores ou pesos) e também a análise da consistência das comparações, dada pela razão de consistência (RC).

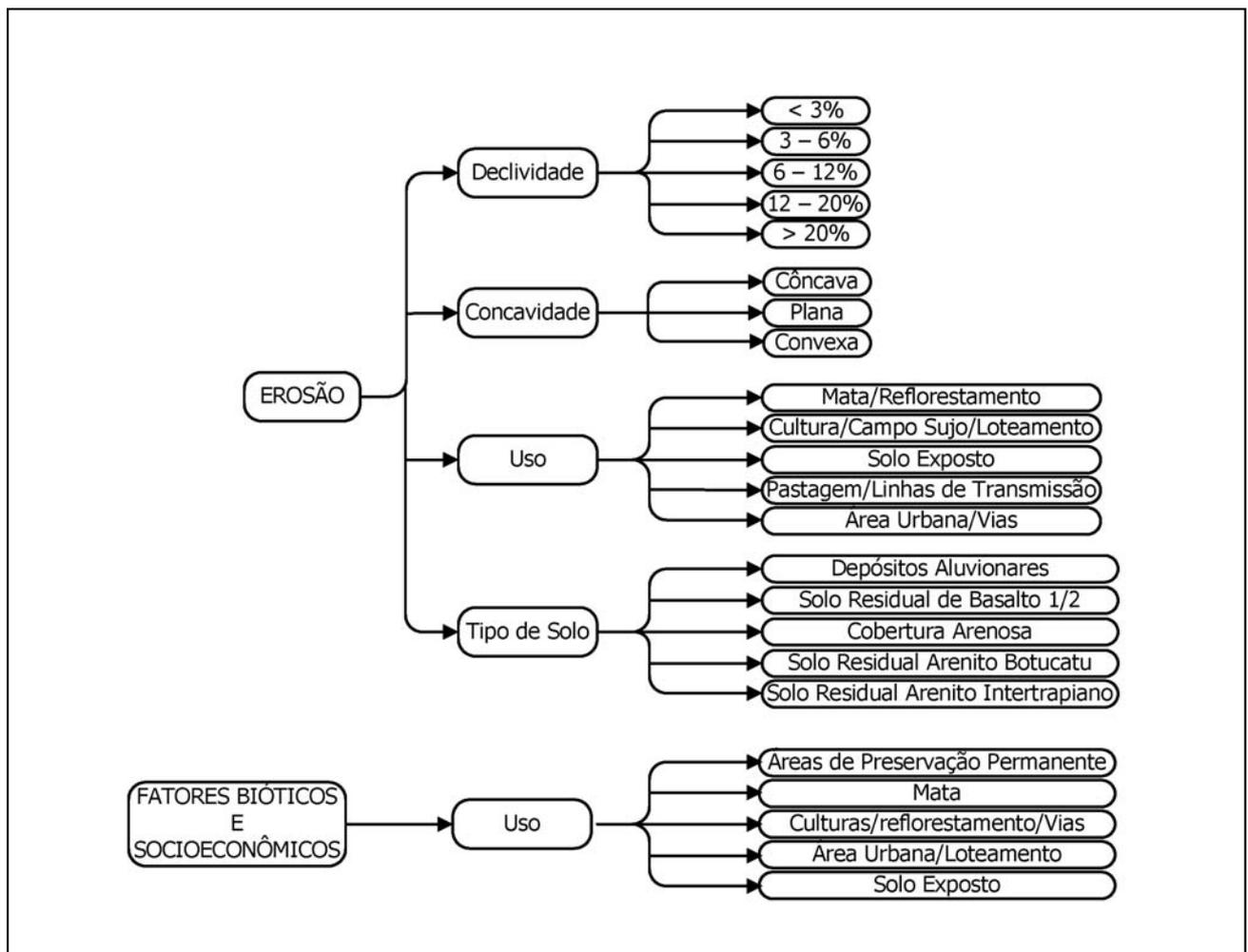


Figura 5. Atributos e classes de atributos definidos para os mapas intermediários.

Tabela 1. Matriz AHP elaborada para erosão.

MATRIZ RECÍPROCA				
Atributos	Declividade	Concavidade	Uso	Tipo de Solo
Declividade	1/1	7/1	2/1	4/1
Concavidade	1/7	1/1	1/4	1/2
Uso	1/2	4/1	1/1	2/1
Tipo de Solo	1/4	2/1	1/2	1/1
SOMA	1,89	14,00	3,75	7,50

MATRIZ NORMALIZADA					
Atributos	Declividade	Concavidade	Uso	Tipo de Solo	AUTOVETOR
Declividade	0,53	0,50	0,53	0,53	0,52
Concavidade	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07
Uso	0,26	0,29	0,27	0,27	0,27
Tipo de Solo	0,13	0,14	0,13	0,13	0,14

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA	
λ máx	4,00
IC	0,00
ICR	0,90
RC	0,00
	0,12%

PESOS FINAIS					
Atributos	Classes				
Declividade	< 3%	3 - 6 %	6 - 12%	12 - 20%	> 20%
Pesos Finais	0,019	0,036	0,071	0,129	0,268
Concavidade	Côncava	Plana	Convexa		
Pesos Finais	0,054	0,006	0,010		
Uso	Mata / Reflorestamento Loteamento / Prop.	Cultura / Campo Sujo /	Solo Exposto	Pastagem / LT	Área Urbana / Vias / Ind.
Pesos Finais	0,018	0,036	0,136	0,070	0,009
Tipo de Solo	Depósitos Aluvionares	S. R. Basalto 1/2	Cobertura Arenosa	S. R. Arenito Botucatu	S. R. Arenito Intertapiano
Pesos Finais	0,009	0,005	0,060	0,037	0,025

Em relação à erosão (Tabela 1), foi apresentada apenas a matriz de ponderação dos atributos, as matrizes referentes a cada classe de atributo foram omitidas para evitar repetições. Além disso, é apresentada uma matriz contendo os pesos finais, que consiste na multiplicação do peso do atributo pelas classes.

Ainda em relação à Tabela 1, verifica-se que na análise da consistência obteve-se valor de RC de 0,12%, que pode ser considerado baixo já que o método considera até o limite de 10%, isto é, as comparações realizadas foram coerentes e geraram resultados confiáveis.

Os autovetores obtidos, que indicam a ordem de importância dos atributos, classificaram em primeiro lugar a

Declividade (52%), seguida pelo Uso (27%), Tipo de Solo (14%) e por último a Concavidade (7%).

Em relação aos fatores bióticos e socioeconômicos (Tabela 2), verificou-se que o valor de RC foi de 3,24%. Valor um pouco maior do que o obtido para erosão, mas ainda dentro do limite aceitável.

Quanto à ordem de importância dos atributos obteve-se em primeiro lugar Áreas de Preservação Permanente (40,9%), seguido por Mata (23%) e Área Urbana/Loteamento (23%), Culturas/Reflorestamento/Estradas (9,8%) e por último Solo Exposto (3,3%).

Tabela 2. Matriz AHP elaborada para fatores bióticos e socioeconômicos.

MATRIZ RECÍPROCA					
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	Área Urbana/ Loteamento	Solo Exposto
APP	1/1	2/1	5/1	2/1	9/1
Mata	1/2	1/1	3/1	1/1	7/1
Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	1/5	1/3	1/1	1/3	5/1
Área Urbana/ Loteamento	1/2	1/1	3/1	1/1	7/1
Solo Exposto	1/9	1/7	1/5	1/7	1/1
SOMA	2,31	4,48	12,20	4,48	29,00

MATRIZ NORMALIZADA						
Classes de Uso	APP	Mata	Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	Área Urbana/ Loteamento	Solo Exposto	AUTOVETOR
APP	0,43	0,45	0,41	0,45	0,31	0,41
Mata	0,22	0,22	0,25	0,22	0,24	0,23
Culturas/ Reflorestamento/ Estradas	0,09	0,07	0,08	0,07	0,17	0,10
Área Urbana/ Loteamento	0,22	0,22	0,25	0,22	0,24	0,23
Solo Exposto	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03

ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA

$\lambda_{\text{máx}}$	5,15	
IC	0,04	
ICR	1,12	
RC	0,03	3,24%

PESOS FINAIS

Classes	Pesos
APP	0,41
Mata	0,230
Culturas / Reflorestamento / Estradas	0,098
Área Urbana/ Loteamento	0,230
Solo Exposto	0,033

Finalmente, puderam ser gerados os mapas intermediários em questão, conforme o método descrito anteriormente e, estes foram então combinados e geraram o Mapa de Fragilidade Ambiental. Para permitir uma melhor visualização dos resultados, foi selecionada uma região na área de estudo para serem apresentados em detalhe ambos os mapas intermediários e também a combinação final que gerou o mapa de fragilidade ambiental. Estes resultados estão exibidos na Figura 6.

Como é possível observar nos mapas apresentados, o mapa de suscetibilidade à erosão apresenta áreas mais críticas nas declividades elevadas, como era de se esperar uma vez que este é

o atributo com maior peso para este mapa (52%). De forma que o método utilizado para sobrepor os atributos (soma ponderada) foi eficiente, pois garantiu que os atributos mais importantes apresentassem maior influência.

Da mesma forma ocorreu no Mapa de suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos, no qual houve destaque para as áreas de preservação permanente (APP's) (40,9%), que pela ponderação realizada recebeu o valor mais elevado. Este resultado se mostra coerente, pois as APP's além de serem áreas que devem manter elementos naturais originais são áreas legalmente protegidas.

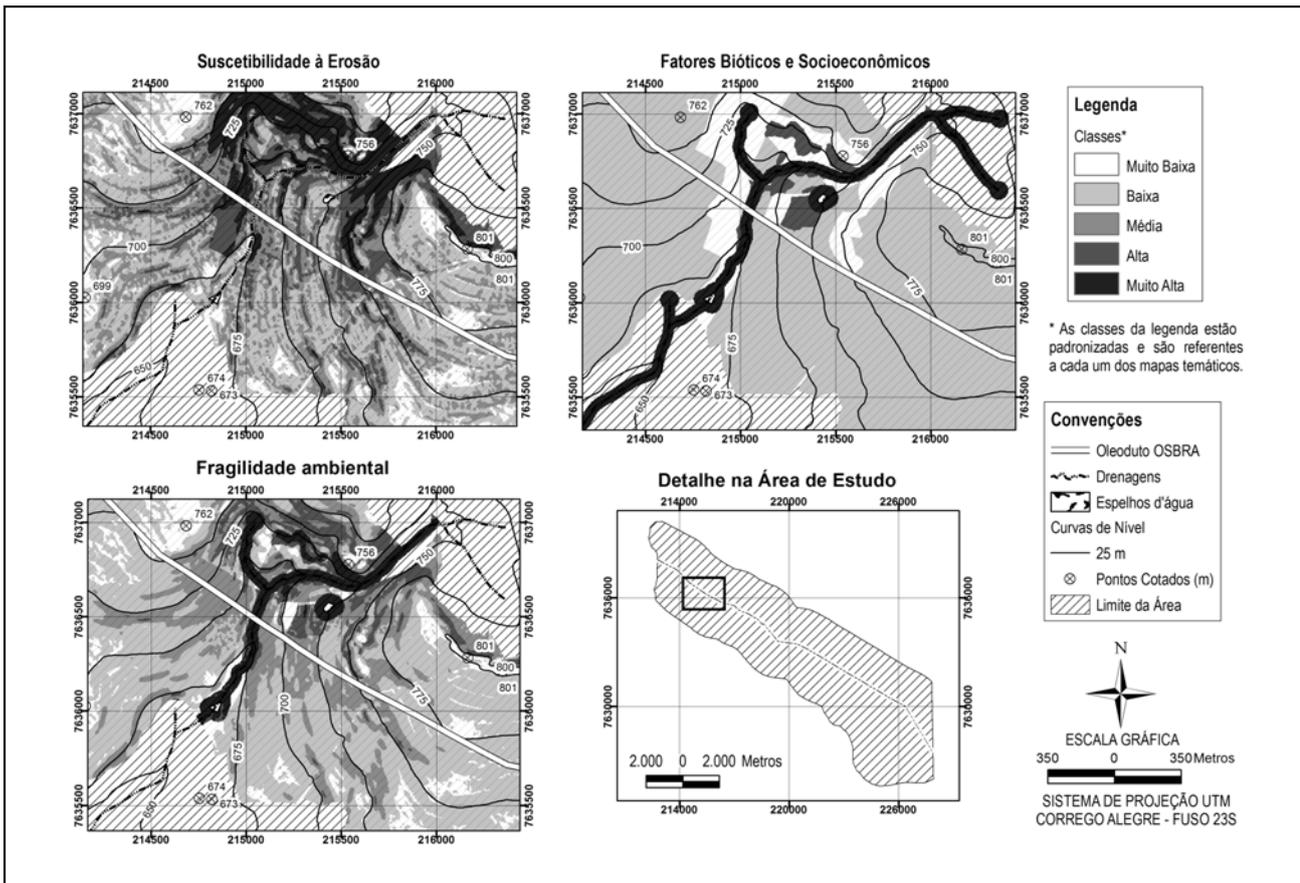


Figura 6. Mapas de erosão, fatores bióticos e socioeconômicos e de fragilidade ambiental.

O mapa final representa bem a combinação dos mapas intermediários, na medida em que destaca as áreas mais críticas de cada mapa e amortiza as áreas intermediárias. Isto reflete que os mapas intermediários apresentam a mesma importância (peso) na geração do mapa de fragilidade ambiental.

Além disso, o mapa de fragilidade ambiental, na medida em que combina os diferentes processos que podem ocorrer aos elementos bióticos e socioeconômicos afetados, representa as áreas que podem ser mais afetadas por mudanças da dinâmica natural existente devido a fatores intrínsecos. Este resultado é justamente o esperado, pois traduz fielmente a definição adotada neste trabalho.

É importante ressaltar que pelo método definido, a princípio, todos os mapas intermediários devem ser utilizados para elaboração do mapa final. Sendo que o apresentado neste artigo é apenas para ilustrar a aplicação do método, já que o objetivo primário do trabalho é apresentar o conceito e método de fragilidade ambiental. Podem ainda ser realizados testes com a combinação de diferentes mapas intermediários a fim de se verificar a sensibilidade do método e da área de estudo aos diferentes processos.

Cabe destacar ainda, que os mapas apresentados poderiam ter recebido tratamento cartográfico em relação à apresentação das áreas. Na medida em que existem fragmentos muito pequenos de determinadas classes, de forma que na escala apresentada eles se tornam pouco representativos. Esses fragmentos podem ser agrupados com um critério de área mínima e incorporados ao polígono de maior área no qual está

contido. Gerando um mapa final com áreas mais contínuas e que possa ser mais facilmente utilizado para gestão ambiental e geotécnica da área.

CONCLUSÕES

Conclui-se que o conceito que melhor define o termo Fragilidade Ambiental é o que considera a desestabilização do equilíbrio dinâmico existente no ambiente, e que esta é uma característica intrínseca do meio ambiente. Além disso, que para avaliar seus diferentes níveis é importante considerar, na medida do possível, aspectos do meio físico, biótico e socioeconômico.

Verificou-se também a importância da seleção cuidadosa de todos os atributos e classes de atributos que serão considerados na geração dos mapas finais. É necessário englobar todos os aspectos do meio ambiente, mas que também sejam coerentes com a área de estudo.

Além disso, o método de Processo de Análise Hierárquica (AHP) se mostrou bastante interessante para a classificação da importância relativa de cada atributo e obtenção dos pesos finais. Através do método é possível assegurar-se que todos os julgamentos realizados foram coerentes, gerando resultados mais confiáveis.

O mapa de fragilidade ambiental gerado para ilustrar a aplicação do método se mostrou bastante condizente com os mapas intermediários usados para gerá-lo. Tal fato indica que o método proposto é adequado à definição conceitual defendida neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- AUGUSTO FILHO, O. 2001.
Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para implantação de seguros em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP).
Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente). Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 196p.
- AUGUSTO FILHO, O. 2008.
Sistema de avaliação de riscos geológico-geotécnicos e ambientais em SIG: aplicação no Oleoduto São Paulo - Brasília (OSBRA) entre São Simão e Ribeirão Preto (SP).
Relatório Científico Final. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 142p.
- AUGUSTO FILHO, O.; HIRAI, J. N.; OLIVEIRA, A. S. E LIOTTI, E. S., 2010.
GIS applied to geotechnical and environmental risk management in a Brazilian oil pipeline.
Bulletin of Engineering Geology and the Environment (Print), v. 69, p. 631-641.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. 1979.
Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos.
In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10. Rio de Janeiro - RJ. 83 p.
- GOLDSMITH, F. B., 1983.
Evaluating Nature. In: Warren A. e Goldsmith F.B. (eds.).
Conservation in Perspective. John Wiley and Sons, Chichester. pp. 233-246.
- LAROUSSE CULTURAL. 1998.
Grande Enciclopédia.
Volume 11. Nova Cultural Ltda.
- MATHEWSON, C. E FONT, R. G. 1974.
Geologic environment: forgotten aspects in the land use planning process.
The Geological Society of America - Engineering Geology Case Histories, 10:23-38.
- NOERNBERG, M. A. E LANA, P. C., 2002.
A sensibilidade de manguezais e marismas a impactos por óleo: fato ou mito? Uma ferramenta para a avaliação da vulnerabilidade de sistemas costeiros a derrames de óleo.
In: Geografares, Vitória, n. 3, jun.
- RATCLIFFE, D. A. 1977.
A Nature Conservation Review.
Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- RATCLIFFE, D. A., 1971.
Criteria for the selection of nature reserves.
Advancement of Sciences, 27. pp. 294-296.
- ROSS, J. L. S. 1994.
Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados.
Revista do Departamento de Geografia. Nº 8. pp. 63-74.
- ROSSI, O. 2001.
Introduzione.
In: Rossi O. (Ed.), Cartografia multiscalare della Natura. Supergrafica. Parma, Itália. pp. 11-20.
- SAATY, T. L. 1980.
The Analytic Hierarchy Process.
McGraw Hill International.
- SISTEMA DE INFORMAÇÕES PARA O GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 2012.
Banco de dados Hidrometeorológicos.
Disponível em http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/sigrh_carrega.exe?f=index/informe_files/dados_dae.html, último acesso em 26 de Abril de 2012.
- SMITH, P. G. R. E THEBERGE, J. B., 1986.
A review of criteria for evaluating natural areas.
Environment Management 10, pp. 715-734.

- SOARES, S. R. 2006.
Gestão e Planejamento Ambiental.
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC.
- TRICART, J. 1977.
Ecodinâmica.
Rio de Janeiro (RJ). FIBGE/SUPREN.
- ZUQUETTE, L. V. 1987.
Análise crítica sobre cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras.
Tese de Doutorado. EESC, São Carlos - SP. 673p.



Modelo linear de mistura espectral na identificação de áreas degradadas por empréstimo de solo, Ilha Solteira - Brasil

Linear spectral mixture model for environmental degradation in soil borrow areas, Ilha Solteira - Brasil

de Lollo, José Augusto ¹ ✉ - Mansini Basso, Paloma ² - Suman Curti, Juliano ³

Recibido: 18 de Junio de 2012 • Aceptado: 07 de Abril de 2013

Resumen

Actividades mineras para obtención de suelos y sedimentos como materiales de construcción representan importante fuente de impactos ambientales. En la década de 1960, periodo de inicio de la construcción de la Planta Hidroeléctrica de Ilha Solteira, no había legislación que impusiera criterios ambientales en cuanto a la implantación de la obra o exigencias en cuanto a la recuperación de tales áreas. La construcción de la Hidroeléctrica ocasionó el surgimiento de varias áreas de préstamo, de entre las cuales la mayor se situó en el área de expansión urbana del municipio de Selvíria (Mato Grosso do Sul, Brasil). El área en estudio presenta porciones con diferentes niveles de degradación y de recuperación, dificultando la clasificación de sus parcelas, tanto en levantamientos de campo como vía técnicas digitales de clasificación de imágenes, justificando el uso del modelo de mezcla. Lo Modelo Lineal de Mezcla Espectral se basa en la posibilidad de clasificar píxeles con respuestas espectrales mezcladas ya que identifica la proporción de los diferentes componentes en un píxel, razón por la cual fue adoptado en el presente trabajo. La comparación entre los resultados obtenidos por esa técnica y por técnicas

tradicionales de clasificación digital de imágenes mostró que el Modelo Lineal de Mezcla Espectral es más eficiente en la distinción entre áreas degradadas en diferentes niveles de recuperación permitiendo la proposición de intervenciones diferenciadas para situaciones diferenciadas.

Palabras clave: *Áreas de préstamo, Modelo lineal de mezcla, degradación ambiental, tratamiento digital de imágenes.*

1. Professor Titular, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Alameda Bahia, 550, CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP, Brasil.

✉ lolloja@dec.feis.unesp.br

2. Mestranda, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Alameda Bahia, 550, CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP, Brasil.

3. Aluno, Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP. Alameda Bahia, 550, CEP 15.385-000, Ilha Solteira - SP, Brasil.

Resumo

Atividades minerais para obtenção de solos e sedimentos como materiais de construção representam importante fonte de impactos ambientais. Na década de 1960, período de início da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, não havia legislação que impusesse critérios ambientais quanto à implantação da obra ou exigências quanto à recuperação das áreas mineradas. A construção da Usina Hidrelétrica ocasionou o surgimento de várias áreas de empréstimo, dentre as quais a maior se situou na área de expansão urbana do município de Selvíria (Mato Grosso do Sul, Brasil). A área em estudo apresenta porções com diferentes estágios de degradação e de recuperação, dificultando a classificação de seu nível de degradação, tanto em levantamentos de campo como via técnicas digitais de classificação de imagens, justificando o uso do modelo de mistura. O Modelo Linear de Mistura Espectral baseia-se na possibilidade de classificar pixels com respostas espectrais misturadas já que identifica a proporção dos diferentes componentes em um pixel, razão pela qual foi adotado no presente trabalho. A comparação entre os resultados obtidos por essa técnica e por técnicas tradicionais de classificação digital de imagens mostrou que o Modelo de Mistura é mais eficiente na distinção entre áreas degradadas em diferentes estágios de recuperação permitindo a proposição de intervenções diferenciadas para situações diferenciadas.

Palavras-chaves: *Áreas de empréstimo, modelo linear de mistura, degradação ambiental, classificação digital de imagens.*

Abstract

Mineral exploration activities to obtain soils and sediments as building materials represent significant environmental impacts. In the 1960s, when the construction of the Hydroelectric Plant of Ilha Solteira began, there was no legislation in place to impose environmental standards regarding the implementation of the construction project, nor were there any requirements for the restoration of the areas mined. The construction of the Hydroelectric Plant resulted in the emergence of several borrowed areas, among which the biggest one was in the urban expansion area of the city of Selvíria (Mato Grosso do Sul, Brazil). The study area has parts with different stages of degradation and recovery, making it difficult to classify their degradation level in field surveys as well as by digital image classification techniques, justifying the use of the mixture model. The Linear Spectral Mixture Model is based on the possibility of classifying pixels with mixed spectral responses, as it identifies the proportion of different components in one pixel, which is why it was used in this work. The comparison between the results obtained using this technique and by traditional digital image classification techniques showed that the Mixture Model is more efficient in distinguishing between degraded areas in different recovery stages, thus allowing proposing different interventions for different situations.

Keywords: *Borrow areas, Linear Spectral Mixture Model, Environmental degradation, Image digital classification.*

INTRODUÇÃO

Apesar de ter importância decisiva para o desenvolvimento do mundo moderno a mineração deixa áreas degradadas que, na maioria das vezes, não podem ser ocupadas racionalmente (Kopezinski, 1998).

Porém, a construção de grandes empreendimentos necessita, na maioria das vezes, do empréstimo de solo de outras regiões, resultando modificações no ambiente em função da remoção da cobertura vegetal e do solo ou de rochas do substrato propiciando processos erosivos e outros impactos ambientais (Kesselring e Kesselring, 1999).

Para a obtenção de solos e sedimentos para a construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira na década de 60, áreas significativas do município de Selvíria (Brasil) sofreram intenso processo de degradação numa época em que não havia legislação no Brasil que impusesse critérios ambientais quanto à implantação de áreas de empréstimo ou exigências de recuperação destas áreas após exploração de recursos minerais.

No Noroeste do Estado de São Paulo, o Complexo Hidrelétrico Urubupungá foi um empreendimento importante nesse período, composto pelas Usinas Hidrelétricas de Ilha Solteira, Engenheiro Souza Dias - Jupia e a Usina Hidrelétrica Três Irmãos em Pereira Barreto.

Por ocasião da construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, o Brasil não possuía leis que estabelecessem exigências de recuperação de áreas degradadas por empréstimo de solo. Atualmente para obras que comprometem o meio ambiente são exigidos por lei a apresentação do PRAD - "Plano de Recuperação de Áreas Degradadas".

Como consequência da mineração de solos para obras de engenharia há uma considerável redução do potencial de uso das áreas impactadas, geralmente limitando-as a usos como pecuária ou turismo e, por se tratarem de áreas rurais ou de expansão urbana, tal problemática não é devidamente valorizada e sintetizada. Desta forma uma das justificativas desta pesquisa refere-se à adequação da técnica eficaz para possíveis estudos.

A classificação dos níveis de intensidade da degradação ou de recuperação e/ou regeneração das áreas deve permitir a proposição de alternativas de intervenções diferenciadas conforme a intensidade destes níveis. No entanto, a definição do estado do ambiente nestas áreas e o acompanhamento da evolução de sua recuperação, exige muitas vezes a realização de levantamentos caros que incluem investigações de campo e laboratório, havendo a necessidade de um mecanismo de avaliação mais ágil e de menor custo para acompanhamento do processo.

A partir desta constatação foi proposto o presente trabalho, que teve como principal objetivo comparar e avaliar processos diferentes de processamento digital de imagem visando à classificação de imagens de satélite. Foram realizadas classificações de cobertura vegetal com as técnicas de classificação tradicionais, com os métodos da Máxima Verossimilhança e o classificador ISOSEG (classificador por regiões para imagens segmentadas); e aplicação do Modelo Linear de Mistura Espectral.

DEGRADAÇÃO ÁREAS DE EMPRÉSTIMO

Para Cruz (2008), uma determinada área é considerada como degradada quando ocorrem impactos ambientais negativos nesta, tais como: alterações das suas propriedades físicas (estrutura ou grau de compactidade e a perda de matéria devido à erosão), e a alteração de características químicas, devido a processos como a salinização, lixiviação, deposição ácida e a introdução de poluentes.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (1989) na NBR 10703 define a ação de degradar o solo como “alteração adversa das características do solo em relação aos seus diversos usos possíveis, tanto os estabelecidos em planejamento, como os potenciais”.

Segundo Tavares (2008), a norma ao citar a expressão “alteração adversa”, sugere a aproximação com o conceito de efeito ou impacto ambiental considerado negativo.

No Manual de Recuperação de Degradação de Áreas Degradadas Pela Mineração (IBAMA, 1990), áreas degradadas são definidas como sendo determinados ambientes que foram destruídas a fauna e flora, a camada fértil de solo perdida, removida ou enterrada e a qualidade do regime de vazão do sistema hídrico foi modificada. Tornando-se uma área inviabilizada no desenvolvimento socioeconômico, devida à perda de seus físicos, químicos e biológicos naturais.

Com relação aos impactos em áreas de empréstimo de solo são considerados os ambientes que sofreram e/ou sofrem a remoção total ou parcial da cobertura vegetal para a exploração do substrato mineral. Em consequência das escavações há alterações nas taxas de infiltração e escoamento, influenciando na umidade do ambiente. Assim como é responsável pela concentração de matéria orgânica, sendo menor a intensidade em relação a áreas vegetadas.

Segundo o artigo nº 225 da Constituição Brasileira é uma obrigação legal, do autor da degradação ambiental, o ônus da recuperação ou reabilitação da área impactada. A Tabela 1 apresenta uma listagem com os impactos surgidos em consequência da utilização de áreas para empréstimos de solo definida a partir dos trabalhos de Christóforo e Nunes (1999), Pereira (1999), Kesselring e Kesselring (1999) e Faria (2005), e classificados nas categorias físico, químico, na biota, e no meio antrópico.

Segundo Corrêa e Leite (1998 em Cruz, 2008) “a erosão é o principal problema em áreas que foram mineradas e abandonadas, pois modificam toda a dinâmica de parte ou total do ecossistema. A perda de partículas acarreta aumento da compactação e diminuição da capacidade de armazenamento de água nos solos e substratos”. Consequentemente diminui as possibilidades de regeneração da área impactada sem intervenção antrópica, uma vez que além da perda de solo à perda de nutrientes.

TRATAMENTO DIGITAL DE IMAGENS

Por Processamento Digital de Imagens entende-se a manipulação de uma imagem por computador de modo que a entrada e a saída do processo sejam imagens. O objetivo de se usar processamento digital de imagens é melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais para o analista humano e fornecer outros subsídios para a sua interpretação, inclusive gerando produtos que possam ser posteriormente submetidos a outros processamentos.

As técnicas de Sensoriamento Remoto (SR) e Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) têm sido utilizados de forma conjugada em estudos de recursos terrestres, com especial atenção para o monitoramento das atividades antrópicas e seus impactos ambientais (Pinto e Lombardo, 2003). Uma destas técnicas é a classificação de imagens de satélite, que tem se mostrado de fundamental importância no auxílio à tomada de decisões de processos como o acompanhamento de recursos naturais e o mapeamento do uso do solo.

Os métodos mais comuns usam a ponderação das distâncias das médias. Para representar os pixels graficamente, utilizam-se isolinhas ou curvas de contorno no espaço de atributos, representando a densidade do conjunto de treinamento para cada região. Esses contornos representam um ajuste baseado em distribuições normais ou gaussianas dos pixels das áreas de treinamento, caso contrário, os contornos seriam totalmente irregulares, o que não seria desejável devido à dificuldade de se computá-los.

O algoritmo de classificação se baseia na distribuição estatística das classes (ex. distribuição gaussiana), onde parâmetros como vetor médio, desvio padrão e matriz de covariância são exigidos para a classificação. Algoritmos paramétricos, muito utilizados com imagens multiespectrais, são o MaxVer (máxima verossimilhança), Paralelepípedo, Mínima Distância, Distância de Mahalanobis (Isoseg) e o K-Médias (algoritmo de agrupamento pela média).

A dificuldade nestas classificações consideradas como convencionais, é que se torna comum ocorrer estimativa incorreta para algumas classes temáticas, devido à existência de pixels misturados, não representados por nenhuma das classes previamente definidas no processamento (Aguilar et al, 1999).

Tabela 1. Impactos mais comuns em áreas de empréstimo de solo.

Físicos	Químicos	Na Biota	No Meio Antrópico
- Descaracterização do relevo	- Perda das camadas férteis do solo	- Desmatamento	- Impacto visual
- Compactação	- Mudanças na Textura	- Remoção da cobertura superficial do solo	- Alterações na forma de uso dos solos
- Processos erosivos	- Salinidade nas águas	- Alterações na flora	- Menor produtividade dos ecossistemas
- Assoreamento do rio	- Mudanças no pH	- Alterações na fauna aquática e terrestre	- Perda de patrimônio
- Remoção da cobertura superficial do solo			- Presença de máquinas expõem população e operários da obra durante a execução dos serviços;
- Retenção de água			

A atual ideia de mapeamento temático presume que cada ponto na superfície possa ser categorizado por meio destes algoritmos classificadores por meio da probabilidade. Entretanto, são vários os fatores que impedem tal feito, entre estes a resolução dos sensores remotos frente à variação e complexidade dos alvos naturais e artificiais. Com isto, uma grande quantidade de dados é ignorada com representações relativamente simplificadas da paisagem.

Contudo, esta é uma situação complexa em imagens com alvos de características espectrais semelhantes, pelo fato de muitas vezes, o valor do pixel não representar o valor de apenas um alvo e sim a interação destes. Essa relação cresce de maneira inversamente proporcional à resolução espacial do sensor, ou seja, quanto mais grosseira a resolução maior a mistura espectral dos componentes presentes. Como tentativa de contornar a dificuldade da mistura espectral surgiu o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME).

O MLME fundamenta-se no pressuposto de que a resposta de um pixel é uma combinação linear da resposta de cada alvo que ocorre em seu interior. Desta forma o cerne deste método é conhecer e representar a proporção dos diferentes componentes presentes em um pixel, a partir da decomposição do pixel em seus espectros puros, conhecidos por endmembers, ou de classes membros de referência (*Shimabukuro e Smith, 1991*).

Os espectros puros ou componentes puros são usados em geral com a finalidade de definir a reflectância espectral de materiais bem caracterizados da superfície da terra, pois estes se misturam para produzir um espectro equivalente aos pixels de interesse na imagem. Como os valores de reflectância dos componentes puros são influenciados por processos que dispersam a energia refletida da superfície dos materiais, ou outros fatores como a geometria da iluminação, o valor apresentado aqui como valor de um componente puro refere-se a sua resposta espectral captada pelo satélite incluindo todos os possíveis ruídos que possam ter afetado a captação da imagem sem que isso afete os resultados obtidos, pois se supõe que o erro que afeta a imagem seja normal por toda ela.

Para *Shimabukuro et al (1998)*, uma relação linear simula a mistura espectral dos componentes contidos em um único pixel. Deste modo, cada pixel possui as informações sobre a proporção e a resposta espectral de cada componente.

Este modelo fundamenta-se no pressuposto de que um espectro misturado (diferentes alvos no campo de visão do sensor), numa imagem qualquer pode ser modelado através de uma combinação linear de espectros puros, conhecidos por endmembers (*Roberts et al, 1998*).

Nestas condições, para qualquer imagem, e sendo as respostas espectrais dos componentes conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas, de forma individual, por meio da geração de Imagens Fração (*Shimabukuro e Smith, 1991; Schowengerdt, 1997; Shimabukuro et al, 1998*).

ÁREA ESTUDADA

A área estudada localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Paraná, umas das principais bacias hidrográficas da América do Sul, em região de clima úmido e sub-úmido. Do ponto de vista geomorfológico a área encontra-se no Vale do Rio Paraná com relevo colinoso e altimetria variando de 250 a 300 m e cobertura vegetal de Savana, típica das áreas de cerrado Brasileiras. As coberturas naturais de Savana que ocorrem na área são Vegetação Natural Arbórea Densa, caracterizada como sendo

uma formação campestre com estrato denso de árvores baixas, xoromórficas, de esgalhamento profuso, providas de grandes folhas coriáceas, perenes e casca corticosa, apresentando de maneira geral estratos definidos.

Na Figura 1 é ilustrada a delimitação da área de empréstimo estudada.

Do ponto de vista geológico a área apresenta substrato rochoso constituído pelos basaltos da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná nos fundos de vale e por arenitos de granulação fina a média, intercalados com finas camadas de siltito pertencentes à Formação Santo Anastácio nas áreas mais elevadas.

Os solos presentes na área apresentam textura arenosa fina e são em geral bastante profundos e bem drenados. Segundo *Alcântara e Lollo (1999)*, o solo é composto por 70% de quartzo, na fração areia, e 14% de hematita, 10% de gibbsita, e 5% de caulinita, na fração argila.

Segundo *Rizzo (2004)* se trata de uma areia argilosa (62% de areia, 10% de silte e 24% de argila) com baixas compacidades (massa específica de 1,69 g/cm³ e índice de vazios de 0,81) e pouco plástico (LL = 26% e LP = 17%).

MATERIAIS E MÉTODOS

Os produtos utilizados foram imagens dos sensores CCD (Couple Charged Device), sensor multiespectral com 20m de resolução espacial e HRC (High Resolution Camera) que opera na faixa espectral que cobre o visível e parte do infravermelho próximo e produz imagens monocromáticas com resolução espacial de 2,7m do satélite CBERS-2B (*INPE, 2011*). Para tratamento e classificação das imagens foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas Spring (*Câmara et al, 1996*).

Foi realizada uma fusão entre as imagens coloridas do sensor CCD e a imagem monocromática do sensor HRC, de forma a se obter imagens multiespectrais com resolução espacial de 2,7 metros, segundo método descrito por *Namikawa (2011)*.

A área em estudo, assim como outras áreas remanescentes de uso para empréstimo de solo apresenta porções com diferentes estágios de degradação e de recuperação natural ou induzida pelo homem, o que dificulta a classificação digital dos alvos, justificando o uso de técnicas como o modelo de mistura.

O Modelo Linear de Mistura Espectral fundamenta-se no pressuposto de que a resposta de um pixel é uma combinação linear da resposta de cada alvo que ocorre em seu interior (*Shimabukuro e Smith, 1991*). A essência do método é identificar a proporção dos diferentes componentes em um pixel, a partir da decomposição do pixel em seus espectros puros, conhecidos por endmembers, ou de classes membros de referência (*Roberts et al, 1998*).

Nestas condições, para qualquer imagem, e sendo as respostas espectrais dos componentes conhecidas, as proporções destes podem ser estimadas, de forma individual, por meio da geração de Imagens Fração. Com isso os endmembers referem-se ao conjunto de espectros "puros" que serão utilizados em um modelo de mistura e que, quando combinados por regra apropriada, são capazes de reproduzir os demais espectros encontrados na imagem.

Visando simplificar a representação das classificações de forma a permitir a comparação entre os diferentes métodos e técnicas de classificação, foram consideradas apenas três classes de alvos na área em estudo (água, vegetação, e solo exposto).

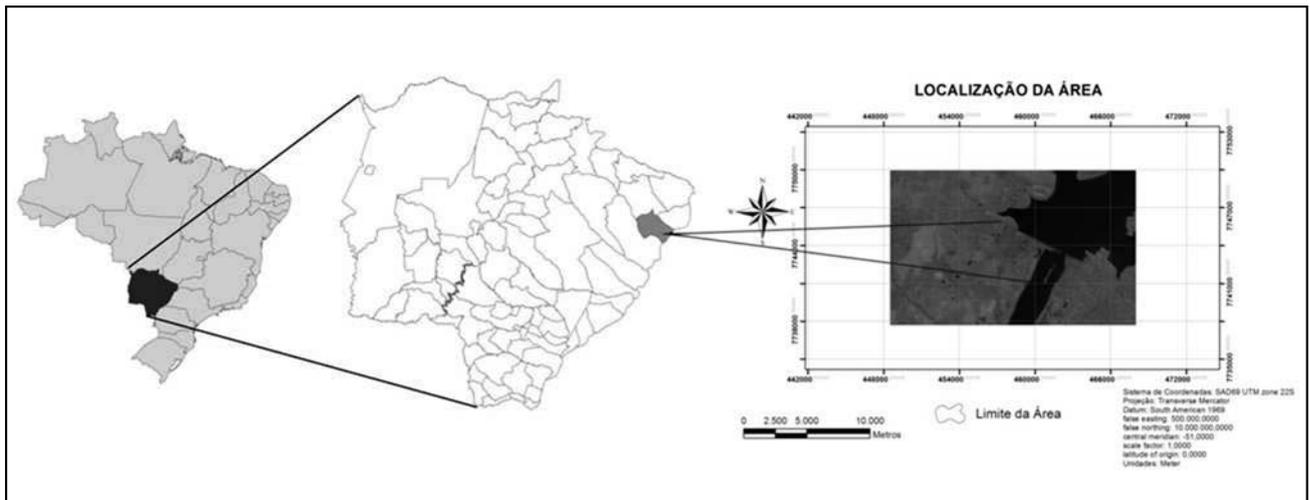


Figura 1. Localização da área de empréstimo estudada.

Tal decisão foi importante também porque excluía dos conjuntos de treinamento usados no processo de classificação áreas ou pixels cuja identificação não estivesse claramente inclusa em uma das classes.

O trabalho considerou métodos tradicionais de Classificação de Imagens como a Classificação supervisionada (pixel a pixel) a partir do Classificador de Máxima Verossimilhança (MAXVER) e a Classificação por Região com o Classificador Ioseg, aplicadas segundo sistemática padrão do SPRING.

Para o classificador de MAXVER as principais etapas para tal classificação incluem: (1) criação dos contextos de classificação e seleção de amostras para treinamento (ilustradas na Figura 2); (2) definição do padrão de classificação (nesse caso limiar de aceitação de 99,9% para o classificador MAXVER); (3) mapeamento das classes obtidas (indicação de pertinência das classes obtidas pela classificação em função dos temas definidos - solos exposto, vegetação e água).

Na classificação por região com o Classificador ISESEG as etapas foram: (1) segmentação da área com pela técnica de crescimento de regiões; (2) definição dos contextos de classificação (limiar de aceitação de 99% para o classificador ISESEG); (3) mapeamento das classes obtidas pelo processo de classificação não supervisionada.

O processo de classificação com base no MLME tem execução mais complexa e pode ser assim sumarizado: (1) seleção das bandas de interesse para aplicação da técnica (nesse caso as bandas 2, 3 e 4 do sensor CCD do Satélite CBERS 2, respec-

tivamente verde, vermelho e infravermelho próximo); (2) obtenção das imagens de erro geradas pelo processo de classificação de pixels puros; (3) seleção das imagens erro para composição do erro máximo permitido; (4) correção das classificações por banda com a aplicação do erro máximo permitido; (5) geração da imagem classificada segundo os temas previstos (solos exposto, vegetação e água).

RESULTADOS

O resultado dos processos de classificação das imagens mostrou diferenças significativas entre as classificações obtidas pelas técnicas tradicionais e o modelo linear de mistura espectral. Nos trabalhos de campo foi possível observar que existem parcelas da área de empréstimo em variados estágios de degradação.

A existência de parcelas da área estudada em processos de recuperação induzida por ações humanas tornou difícil a diferenciação via sensoriamento remoto por imagens de satélite daquelas áreas em processo natural de recuperação no presente trabalho.

Do que se observa no campo, se pode verificar que isso se deve essencialmente ao fator escala e à forma de cultivo das espécies utilizadas, pois as áreas em processo de recuperação induzida apresentam pequenas dimensões (dezenas de metros em cada lado) e um padrão de vegetação que mistura espécies arbóreas de diferentes alturas e outras espécies de vegetação rasteira cujo padrão em imagem reproduz quase exatamente a vegetação em processo de recuperação.

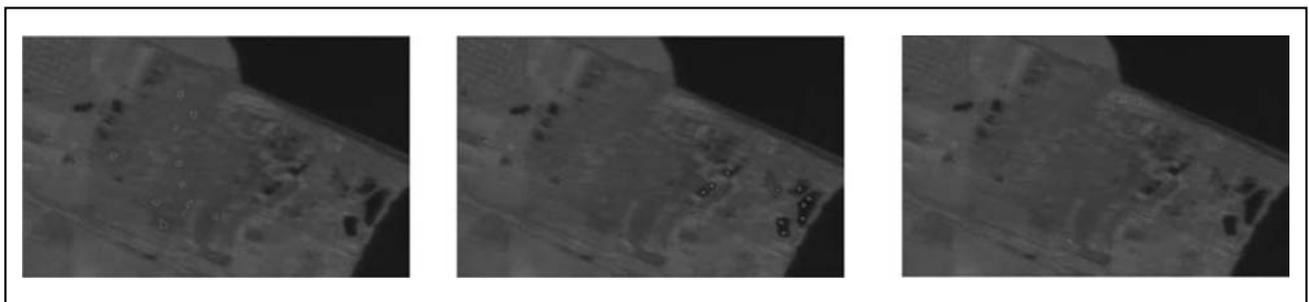


Figura 2. Ilustração das amostras usadas no treinamento (à esquerda classe solo exposto, ao centro classe água, e à direita classe vegetação).

Acredita-se que a diferença essencial entre as áreas em processo de recuperação natural e induzida (padrão regular geométrico da vegetação arbustiva cultivada) só seria identificável em grandes áreas ou pelo uso de imagens oriundas de sensores com resolução espacial ainda maior que a câmara HRC, situação comum em outros tipos de imageamento quando se pretende a identificação de padrões regulares de vegetação de pequeno a médio porte com grande porção de solo exposto entre as árvores.

A seguir podem ser observados os resultados das classificações feitas pelo método de Máxima Verossimilhança usando-se os processos de classificações por pixels (Figura 3) e por regiões (Figura 4) nas imagens não fusionadas (sensor CCD com resolução espacial de 20m).

Os resultados das duas classificações feitas com as bandas do sensor CCD com resolução espacial de 20 metros mostram diferenças marcantes com relação às classes “solo exposto” e “vegetação”. A matriz de erros apresentada na Tabela 2 ilustra esses resultados.

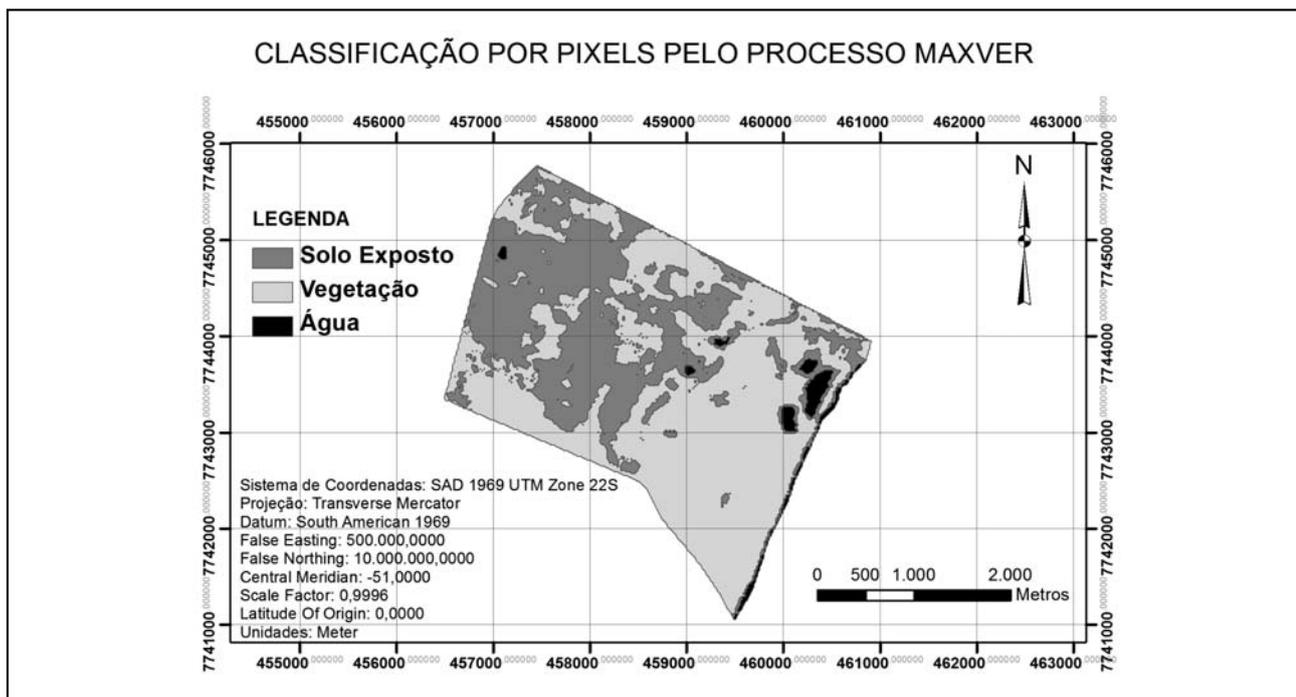


Figura 3. Classificação por pixels pelo processo MAXVER.

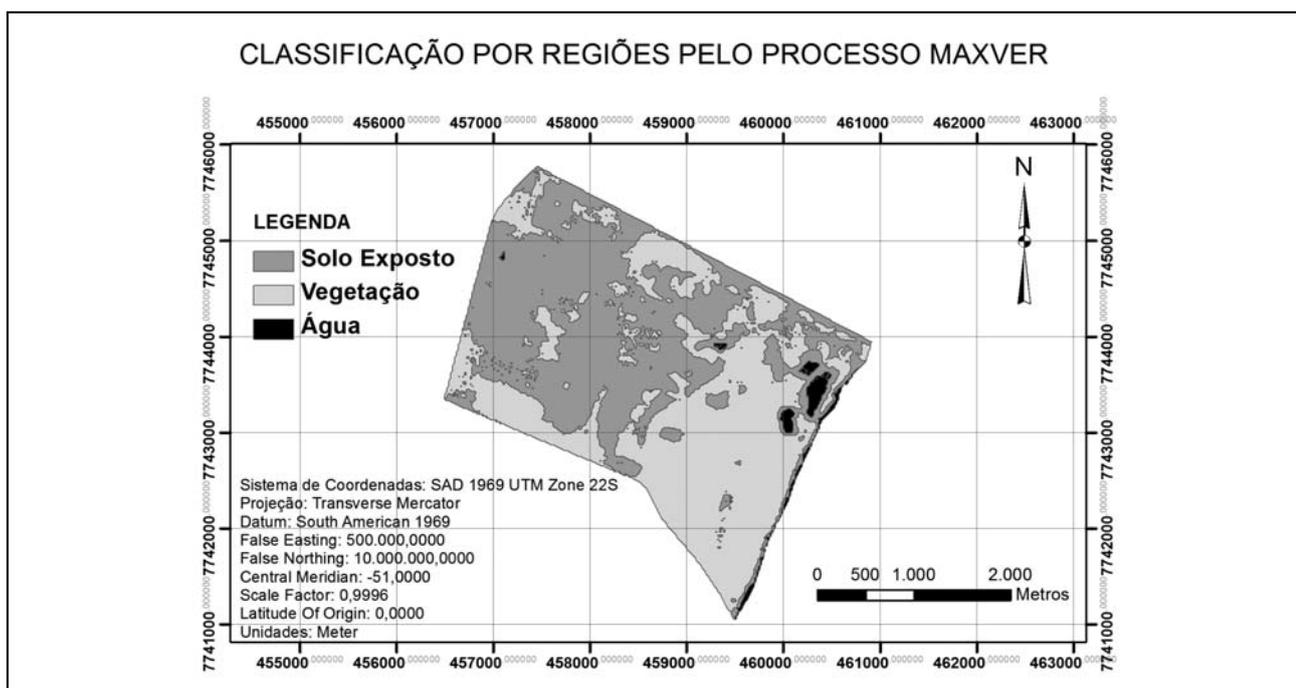


Figura 4. Classificação por regiões pelo processo MAXVER.

Observa-se que as parcelas da área classificadas como “solo exposto” apresentam área total maior quando classificadas por regiões em comparação à classificação por pixel, o que se confirma com os resultados da matriz de erros. Por outro lado, a classe “vegetação” apresenta menor área na classificação por regiões se comparada à classificação por pixel (vide matriz de erros na Tabela 2). Acredita-se que tal resultado se deva ao fato da classificação por regiões, por usar amostras com maiores áreas, apresenta maior variação nas respostas espectrais que os pixels puros.

Como já mencionado, nos trabalhos de campo foi possível observar que existem parcelas da área de empréstimo em variados estágios de degradação. Parte significativa da área foi alvo de escavações bastante profundas que removeram todo o horizonte B do solo tornando a recuperação natural inviável e que, em áreas com maiores declividades e encostas com perfil convexo o que facilitou a instalação de processos erosivos representados por extenso ravinamento e eventual desenvolvimento de voçorocas.

Existem parcelas que ainda conservam vegetação arbórea original bastante densa e que não foi alvo de escavação devido a dificuldades operacionais relacionadas ao relevo local (porções mais elevadas da área e com declividades mais acentuadas)

devido à pequena espessura de solo no perfil. Tanto no campo como nas imagens de satélite a definição dos limites entre essas duas categorias é relativamente fácil, dada a grande diferença na cobertura vegetal, o que se refletiu na continuidade das áreas classificadas como “vegetação” quando da realização desse trabalho.

O terceiro estágio de degradação de parcelas da área corresponde a parcelas em processo de recuperação (natural ou induzida), Nessas áreas parte da vegetação rasteira ou arbórea já se instalou e a distinção visual de qual condição prevalece é praticamente impossível, seja em trabalhos de campo ou de sensoriamento remoto.

A identificação das áreas em processo de recuperação é a principal dificuldade no uso de classificação de imagens para identificar áreas degradadas já que a resposta espectral mista de tais alvos faz com que às vezes os mesmos sejam identificados como áreas degradadas e outras vezes como áreas não degradadas em função das características da imagem usada e, principalmente, da densidade da vegetação e sua tonalidade em função de maior absorção de água do solo em períodos de maior precipitação pluviométrica. Por essa razão optou-se aqui por verificar o potencial de uso do MLME para a classificação das imagens (Figuras 5 e 6).

Tabela 2. Matriz de erros - MAXVER por pixel (linhas) X MAXVER por regiões (colunas).

	Água	Solo	Vegetação	Total
Água	0,82%	0,66%	0,00%	1,48%
Solo	0,11%	37,56%	1,45%	39,12%
Vegetação	0,00%	12,19%	47,21%	59,40%
Total	0,93%	50,41%	48,66%	100,00%

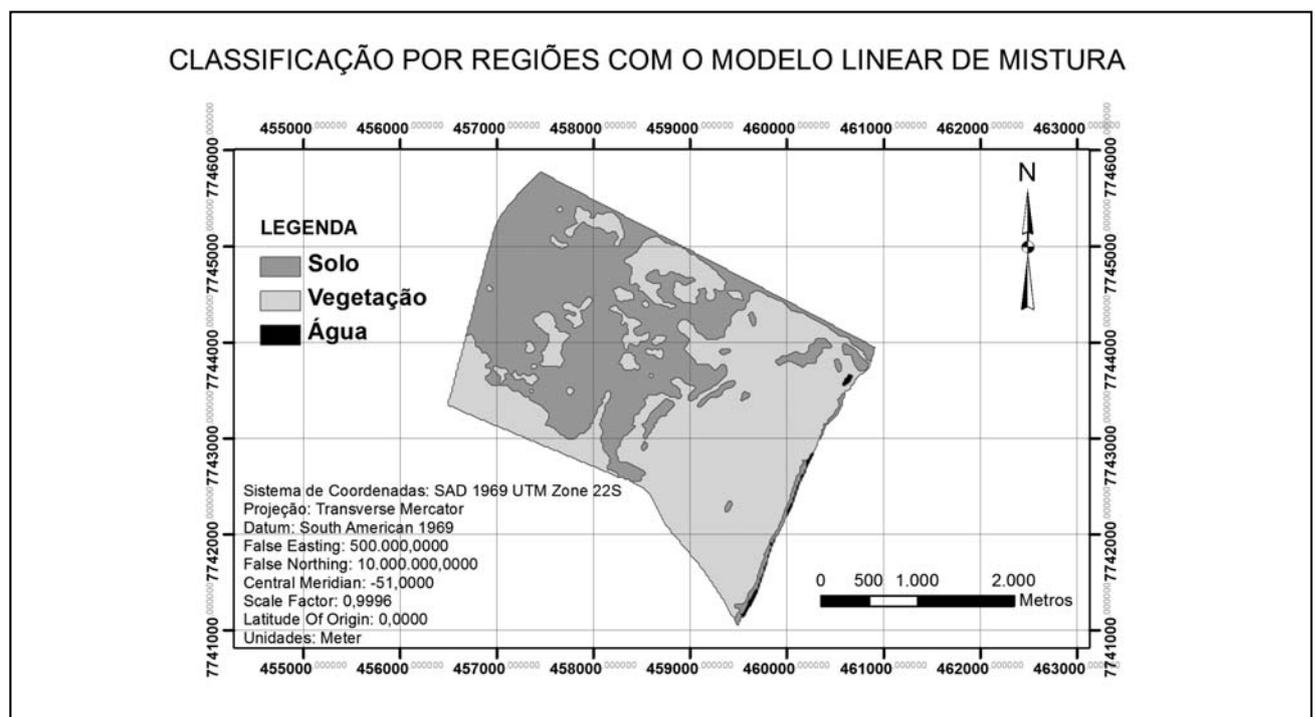


Figura 5. Classificação por regiões com o MLME.

Também nesse caso, a classificação por região gera maiores áreas que a classificação por pixel para as áreas identificadas solo exposto, ressaltando confusão pelo software na distinção entre vegetação (pixels mistos com solo) e solo exposto, como se pode observar na matriz de erros apresentada na Tabela 3.

A seguir é apresentada a classificação obtida com as imagens fusionadas com dados dos sensores CCD e HRC resultando resolução espacial de 2,7m. É possível notar melhor precisão na identificação de pequenas áreas degradadas ou em processo de degradação (Figura 6), resultado que pode ser explicado pela maior resolução espectral da imagem associada à capacidade da

técnica de tratar com pixels misturados. Tal afirmação é confirmada pela matriz de erros da Tabela 4.

Trabalhos de campo indicam uma tendência de que a combinação de MLME com imagens de maior resolução reconheça como áreas em processo de recuperação, aquelas áreas com cobertura vegetal de cerrado, especialmente se a vegetação rasteira for menos densa. Essa pode ser uma situação de difícil solução em áreas de cerrado em períodos de seca, o que pode indicar a preferência por imagens de meses chuvosos para tais análises.

Tabela 3. Matriz de erros MAXVER por pixel (linhas) X MLME por regiões (colunas).

	Água	Solo	Vegetação	Total
Água	0,43%	0,21%	0,13%	0,77%
Solo	0,12%	39,82%	1,83%	41,77%
Vegetação	0,08%	9,86%	47,52%	57,46%
Total	0,63%	49,89%	49,48%	100,00%

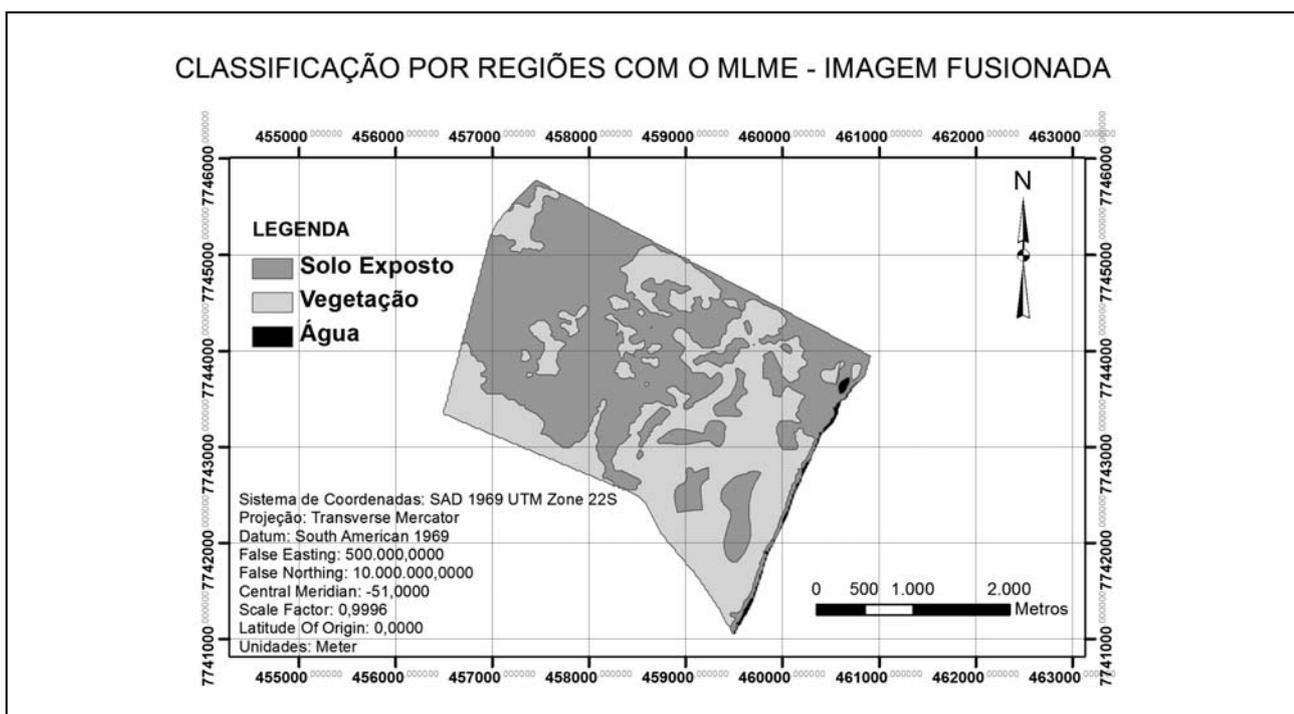


Figura 6. Classificação por regiões com o MLME com a imagem fusionada.

Tabela 4. Matriz de erros MLME - resolução 20m (linhas) X MLME - resolução 2,7m (colunas).

	Água	Solo	Vegetação	Total
Água	0,34%	0,23%	0,37%	0,94%
Solo	0,09%	45,63%	0,62%	46,34%
Vegetação	0,48%	13,21%	39,03%	52,72%
Total	0,91%	59,07%	40,02%	100,00%

Quando se observa os resultados das classificações feitas com as técnicas de máxima verossimilhança e a classificação por regiões fica evidente que as duas classificações não apresentam diferenças significativas. As parcelas da área classificadas como “solo exposto” são muito similares a menos de maior continuidade nas áreas delimitadas pela técnica de regiões o que é fato esperado e conhecido da literatura já que a amostragem de áreas maiores no conjunto de treinamento gera menor confusão na identificação de padrões visto tais áreas apresentarem mais variações nas respostas espectrais que os pixels puros.

Em geral tais classificações tendem a reduzir as parcelas da área identificadas como solo exposto uma vez que nas áreas degradadas que se encontram em processo de recuperação a presença de alguma vegetação resulta pixels com resposta espectral mais similar à vegetação que às áreas de solo exposto e os métodos tendem a classificar tais parcelas como áreas de vegetação. Isso subestima a identificação de áreas degradadas. Tal efeito pode ser observado na Figura 3.

A utilização do modelo linear de mistura espectral para permite a classificação de áreas em processo de recuperação como áreas degradadas – solo exposto ao invés de áreas vegetadas, isso é interessante porque torna possível a distinção das áreas em processo de recuperação, ou seja, que sofreram degradação no passado, daquelas não degradadas (Figura 5).

CONCLUSÕES

Em geral, menor resolução espacial permite boa definição para classificação de pixels puros (sem mistura) podendo ser usada para identificar as condições extremas da área – com ou

sem degradação, ou seja, vegetação ou solo exposto. Nesse caso, a classificação por pixels pode ser ainda mais interessante, pois a classificação por regiões tende a apresentar um efeito generalizador, agrupando pixels similares em função dos elementos do conjunto de treinamento apresentar uma resposta espectral que corresponde à média das respostas individuais.

A utilização no modelo linear de mistura espectral para classificar imagens de menor resolução espacial (20m) tende a permitir a classificação de áreas em processo de recuperação como “áreas degradadas – solo exposto” ao invés de áreas vegetadas, isso é interessante porque torna possível a distinção das áreas em processo de recuperação, ou seja, que sofreram degradação no passado, daquelas não degradadas (Figura 5). Quando o modelo linear de mistura espectral foi aplicado para classificar as imagens fusionadas com maior resolução espacial (2,7m) ficaram mais evidentes as áreas degradadas em diferentes estágios de recuperação (Figura 6). No campo se observa que as áreas em início de processo de recuperação, que na classificação das imagens de resolução espacial de 20m passaram a serem classificadas como solo exposto, o que na realidade expressa um resultado mais próximo da condição de tais áreas (início de processo de recuperação).

Para uso em situações similares a classificação por máxima verossimilhança pode ser útil especialmente em reconhecimentos preliminares, em particular quando o objetivo for identificar as áreas preservadas da degradação ou corpos d'água contínuos. Para estudos detalhados visando identificar áreas em processo de recuperação com menores dimensões, o uso do Modelo Linear de Mistura Espectral associado a imagens com maior resolução espacial foi mais eficiente.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

- AGUIAR, A. P.D., SHIMABUKURO, Y.E., MASCARENHAS, N.D.A. 1999. Use of synthetic bands derived from mixing models in the multispectral classification of remote sensing images. *International Journal of Remote Sensing*, v. 20, p. 647-657.
- ALCÂNTARA M.A.M., LOLLO, J.A. 1999. Evaluation of mechanic performance of lime-soil mixtures under distinct exposition condition. *Journal of Nepal Geological Society, Nepal Geological Society, Kathmandu, Nepal. Special Volume - VII Asian Congress of Engineering Geology*, p. 7 -14.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1989. NBR 10.703: Degradação do solo: terminologia, Rio de Janeiro,
- CÂMARA, G., SOUZA, R.C.M., FREITAS, U.M., GARRIDO, J., LI, M.F. 1996. SPRING: integrating remote sensing and GIS with object-oriented data modeling. *Computers and Graphics*. Vol. 15, p. 13-22.
- CHRISTÓFARO I.S.I., NUNES, J.H. 1999. Reabilitação de Caixas de Empréstimo Laterais - Uma Abordagem Interdisciplinar, *In: Seminário Nacional: A Variável Ambiental em Obras Rodoviárias. Foz do Iguaçu, 1999. Anais. Editado por Edson Roberto Blanchet, Maurício Balensiefer, Nívea Ribeiro Menegazzo e Rosana Scaramella. Curitiba: FUPEF, 508 p.*
- CRUZ, S.P. 2008. Avaliação da degradação do meio físico por áreas de empréstimo usando geoindicadores e sistema de informações geográficas - Área urbana de Ilha Solteira (SP). Ilha Solteira/SP: UNESP, Dissertação de mestrado.
- FARIA, S.M. Reabilitação e Sustentabilidade Ambiental de Áreas degradadas com a Utilização de Plantas Associadas a Microrganismos Simbióticos. 2005. Disponível em: <www.ambientebrasil.com.br>. Acesso em 23/05/2010.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. Catálogo de Imagens. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSRI>. Acesso em: 05/03/2011.

- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. 1990.
Manual de recuperação de áreas degradadas pela mineração.
Brasília, DF, 96 p.
- KESSELRING, A.E.B., KESSELRING, R.C.S. 1999.
Reabilitação de Caixas de Empréstimo Laterais - Uma Abordagem Interdisciplinar,
In: Seminário Nacional: A Variável Ambiental em Obras Rodoviárias. Anais... Curitiba: FUPEF, 508 p.
- KOPEZINSKI, I. 1998.
Avaliação da degradação ambiental produzida por mineração no Município de Poços de Caldas (MG).
*Escola de Engenharia de São Carlos / Universidade de São Paulo, 1998, 102p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia),
Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo.*
- NAMIKAWA, L.M.
Fusão de Imagens do Satélite CBERS-2B no SPRING.
Disponível em: wiki.dpi.inpr.br_doku.php_id=fusaohrcccdceber2b_exemplo.pdf. Acesso em: 21/09/2011.
- PEREIRA, K.M.T. 1999.
Reabilitação de Caixas de Empréstimo Laterais - Uma Abordagem Interdisciplinar,
*In: Seminário Nacional: A Variável Ambiental em Obras Rodoviárias. Foz do Iguaçu, 1999. Anais
Editado por Edson Roberto Blanchet, Maurício Balensiefer, Nívea Ribeiro Menegazzo e Rosana Scaramella.
Curitiba: FUPEF, 508 p.*
- PINTO, S. A. F., LOMBARDO, M. A. 2003.
O Uso do Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas no Mapeamento e Uso da Terra
e Erosão do Solo.
*In: Congresso Brasileiro de Cartografia, 21, 2003, Belo Horizonte. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira
de Cartografia.*
- RIZZO, R.P. 2004.
Avaliação da condutividade hidráulica em solo laterítico arenoso compactado estabilizado com cimento
para uso como liner. 98p,
*Dissertação (mestrado em Recursos Hídricos e tecnologias Ambientais) - Faculdade de Engenharia de Ilha
Solteira/Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.*
- ROBERTS, D.A., GARDNER M., CHURCH, R., USTIN, S., SCHEER, G., GREEN, R.O. 1998.
Mapping chaparral in the Santa Monica Mountains using multiple endmember spectral mixture models.
Remote Sensing of Environment, Vol. 65, p. 267-279.
- SCHOWENGERDT, R.A. 1997.
Remote sensing: models and methods for image processing.
New York: Academic Press, 2ª ed. 522 p.
- SHIMABUKURO, Y.E., SMITH, J.A. 1991.
The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data.
IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 29, p.16-20.
- SHIMABUKURO, Y.E., NOVO, E.M., PONZONI, F.J. 1998.
Índice de vegetação e modelo linear de mistura espectral no monitoramento da região do Pantanal.
Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 33, p. 1729-1737.
- TAVARES, A.B. 2008.
Avaliação da Degradação do Meio Físico por Áreas de Empréstimo Utilizando Geoindicadores e
Sistema de Informações Geográficas - Área de Expansão Urbana de Ilha Solteira (SP).
*Ilha Solteira, 192p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira -
Universidade Estadual Paulista.*



Influencia del tamaño de las partículas del agregado reactivo frente a los álcalis en las barras de mortero

Influence of reactive aggregate size front to the alkalis in mortar bars

Falcone, Darío D. ¹⁻² ✉ - Coelho dos Santos, Gabriela S. ¹⁻³

Recibido: 13 de Julio de 2012 • Aceptado: 07 de Abril de 2013

Resumen

Uno de los temas más investigados vinculado a la durabilidad de las estructuras de hormigón es la reacción álcali-silíce (RAS), ya que esta reacción se produce dentro del hormigón y provoca fallas estructurales de gran importancia cuando no es controlada. Para que se produzca necesitamos un agregado potencialmente reactivo, álcalis (cemento portland) y humedad. La reacción produce un gel silico-alcálico expansivo que genera fisuras y deterioro de las estructuras de hormigón. Otros factores que controlan la RAS son el porcentaje y el tamaño de partícula de agregado reactivo, que pueden generar un efecto de "pessimum" produciendo valores de máxima expansión en morteros u hormigones.

En el presente trabajo se tratará de establecer, mediante el ensayo acelerado de la barra de mortero, si el efecto de "pessimum" se hace efectivo a un tamaño de partícula específico de agregado reactivo. En la confección de los morteros se utilizó un agregado fino compuesto por 90% de arena natural silico-feldespática no reactiva y un 10% de arenisca "de Chaco" (arena de trituración) potencialmente reactiva, tomando de esta última diferentes fracciones granulométricas para la realización de las distintas mezclas. Los resultados del ensayo físico y el análisis petrográfico de las barras muestran que los mayores valores de expansión coinciden con un rango granulométrico determinado y estos resultados se corroboran por la presencia de los rasgos deletéreos observados durante el estudio petrográfico.

Palabras Clave: morteros, arenisca, RAS, tamaño de partícula, "pessimum".

Abstract

One of the most researched topics in the durability of concrete structures is the alkali-silica reaction (ASR), since this reaction produced in the concrete because of the presence of a potentially reactive aggregate, alkali (present in Portland cement) and humidity - causes structural failures of great importance when

1. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. La Plata - Argentina.

✉ durabilidad@lemit.gov.ar

2. Profesional Principal CIC-LEMIT-
Docente Facultad de Ingeniería, UNLP

3. Personal de Apoyo CIC-LEMIT

it is not controlled. The reaction produces a silico-alkaline expansive gel generating cracks and deterioration of the structures of concrete. Other factors controlling the RAS is the percentage and the particle size of reactive aggregate, which can generate an effect of "pessimum" on mortar and concrete studied in the present work through the Mortar-Bar Method.

In the mortar a fine aggregate was used, consisting of 90% of non-reactive natural sand and 10% reactive crushed sand ("Chaco" sandstone) varying the size of the granulometric fraction. The influence of the aggregate size in the bars is expressed both in expansion values determined in the test as the petrographic analysis on thin sections, determining that the highest values of expansion coincide with a specific granulometric rang, corroborated by the deleterious features found in thin sections of mortars.

Keywords: mortars, sandstone, ASR, aggregate size, "pessimum".

INTRODUCCIÓN

La reacción álcali-sílice (RAS) se produce entre los iones hidroxilos de la solución fuertemente alcalina contenida en el "líquido de poros" del hormigón y ciertos componentes silíceos presentes en los agregados como son la calcedonia, tridimita, cristobalita, ópalo, vidrio volcánico y cuarzo tensionado de origen metamórfico (Fava et al., 1961; Cortelezzi et al., 1990; Cortelezzi et al., 1991; Batic et al., 1990), en presencia de humedad superior al 80% de manera permanente o periódica (Hansen, 1944; Batic y Sota, 1991; Falcone et al., 2006). La reacción produce un gel silico-alcálico expansivo que genera la fisuración y como consecuencia el deterioro de las estructuras de hormigón (Colina et al., 1967; Batic et al., 1990; Bérubé y Fournier, 1993; Batic y Sota, 2001). El efecto "pessimum" se define como el máximo nivel de expansión que ocurrirá con un contenido particular de los constituyentes reactivos (Sims y Nixon, 2003). Batic y Sota (2001) expresan que agregados que

contienen ópalo o vidrio volcánico como constituyentes reactivos presentan la máxima expansión para una proporción o para un tamaño determinado de las partículas reactivas, dando lugar a un efecto de "pessimum". Trabajos como los de Kodama y Nishino (1987), Grattan-Bellew (1989) y Zhang et al. (1999) entre otros muestran la influencia del tamaño de partícula sobre expansiones debidas a la RAS en barras de mortero y hormigones confeccionados en laboratorio.

En Argentina, estudios recientes demuestran la reactividad potencial alcalina de ciertas areniscas utilizadas como agregado para el hormigón. Marfil et al. (2012) comprueba la reactividad de areniscas cuarzosas cementadas con sílice identificada como calcedonia, tridimita, cristobalita, y ópalo. Las muestras estudiadas corresponden a una cantera en la provincia de Corrientes y fueron ensayadas por el método del prisma de hormigón (ASTM C 1293, 2008) y por el método acelerado de la barra de mortero (ASTM C 1260, 2008).



Figura 1. Mapa ubicación de la cantera Las Piedritas; (A) en el marco de la República Argentina; (B) en el marco regional destacándose los aspectos estructurales más importantes. Mapa de autor, basado en el mapa geológico de la República Argentina, Servicio Geológico Minero Argentino. Escala 1:2.500.000 (año 1997).

La arenisca en estudio ha sido evaluada durante los últimos 20 años con distintos ensayos físicos de laboratorio (IRAM 1637, 1992; IRAM 1674, 1997; IRAM 1700, 1997) confirmando su alto potencial reactivo frente a los álcalis del cemento portland (Batic et al., 1995; Coelho dos Santos y Falcone, 2012) y pertenecen a muestras tomadas de la cantera “Las Piedritas”, provincia de Chaco (Figura 1), cuyo afloramiento rocoso es designado actualmente como Formación Las Piedritas. Existen diversas interpretaciones respecto a su origen, de posible correlación con areniscas pliocenas de la Formación Ituzaingó o con la Formación Tacuarembó de edad Jurásico-Cretácico. Sin embargo, la edad y significado geológico de estos registros sedimentarios son aún inciertos (Peri y Rossello, 2010). Batic et al. (1995) describen el afloramiento del frente de la cantera, constituido por tres niveles de ortocuarcitas que completan 10 m de potencia, encontrando de base a techo: ortocuarcitas blancas a rosadas, ortocuarcitas rosadas con cemento calcáreo y ortocuarcitas rojizas muy compactas con cemento silíceo, venas de cuarzo y niveles arcillosos blanquecinos. Por último en discordancia angular sobre las ortocuarcitas yace un cuerpo de 3m de calizas macizas, sin estructuras sedimentarias, más friables hacia la base con clastos de ortocuarcitas rojizas. Las muestras utilizadas en el estudio se tomaron del último nivel de ortocuarcitas descripto.

El objetivo del presente trabajo es estudiar a través del método acelerado de la barra de mortero y de las técnicas petrográficas la incidencia del tamaño de las partículas reactivas sobre los valores de expansión en los distintos morteros, y el efecto de “pessimum” producido a un determinado rango granulométrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de los morteros, las muestras de arenisca fueron trituradas a tamaño arena y fraccionadas con los tamices IRAM 4,75mm - 2,36mm (4-8), IRAM 2,36mm - 1,18mm (8-16), IRAM 1,18 - 0,60mm (16-30), IRAM 0,60 - 0,30mm (30-50) e IRAM 0,30 - 0,15mm (50-100). Las fracciones fueron lavadas para eliminar el polvo producto del proceso de trituración y secadas en estufa a 100 ± 5 °C, hasta peso constante. En el caso de la arena de composición sílica feldespática caracterizada como no reactiva, denominada “Arena Oriental” (AO) se utilizó con la granulometría natural. Para la mezcla se empleó un cemento portland normal CPN 40 de alto álcalis, con contenidos de óxido de sodio equivalente ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) igual a $0,9 \pm 0,1\%$ y agua desmineralizada. Para elaborar la solución de estacionamiento se utilizó NaOH p.a. (pro análisis).

Los ensayos se realizaron según el método acelerado de la barra de mortero, IRAM 1674 (1997)/ASTM C 1260 (2008), que consiste en mezclar el mortero en estado fresco de forma mecánica durante 4 minutos, luego se llenan los moldes (25mm x 25mm x 280mm) en dos capas y se almacenan a 20 ± 2 °C, sin pérdida de humedad. Las barras se desmoldan a las 24 horas de edad, se realiza una lectura de referencia y se sumergen en agua, a temperatura ambiente, llevando el conjunto a estufa a 80 ± 2 °C durante 24 horas. Pasado este tiempo, se realiza la lectura inicial de las barras y se sumergen en una solución 1N de NaOH a 80 °C. Periódicamente se realizan lecturas, por ejemplo, cada 48 horas hasta los 16 días de edad.

Para estudiar la reactividad alcalina potencial de la arenisca y la influencia del tamaño de las partículas reactivas en la expansión de morteros, se realizaron 5 mezclas en la cual se reemplazó el 10% de una arena sílica feldespática natural no reactiva (AO) por fracciones de distinto tamaño de una arenisca reactiva de trituración (arenisca de la Formación Las Piedritas o “de Chaco”). En la Tabla 1 se indican las proporciones de cada mezcla, elaboradas con 900 g de agregado fino, 400 g de cemento y 188 g de agua de mezclado, con lo cual la razón agua/cemento es de 0,47.

Una vez finalizado el ensayo acelerado de la barra de mortero, se procedió a la realización de secciones delgadas de las barras como así también de la arenisca en estado natural. El estudio petrográfico-mineralógico de la arenisca se realizó sobre la base de la norma ASTM C 295 (2008) y el análisis petrográfico de los morteros fue realizado según lo especificado en la norma ASTM C 856 (2008), utilizando lupa binocular (Olympus SZ61) y microscopio petrográfico de polarización (Olympus BH2-UMA). Para la toma de fotografías y el procesamiento de imágenes se utilizó una cámara digital Sony ExwaveHAD conectada al microscopio óptico de polarización y una cámara fotográfica digital INFINITY1-3C conectada al equipo de lupa binocular, ambas con software de procesamiento de imágenes manejados en PC (Image Pro-Plus 6.3.e INFINITY respectivamente).

RESULTADOS

Resultado del método acelerado de la barra de mortero:

En el gráfico de la Figura 2a se muestran las expansiones experimentadas por las barras confeccionadas con las fracciones granulométricas correspondientes a los tamices IRAM 4,75mm - 2,36mm (4-8), IRAM 2,36mm - 1,18mm (8-16), IRAM 1,18 - 0,60mm (16-30), IRAM 0,60 - 0,30mm (30-50) e IRAM 0,30 - 0,15mm (50-100). En el gráfico correspondiente a la Figura 2b se relaciona el tamaño de partícula con los valores de expansión obtenidos en el ensayo.

Tabla 1. Composición de las mezclas.

Mezcla	Denominación	Fracciones (mm) de la Arenisca					Arena Natural
		4,75 - 2,36	2,36 - 1,18	1,18 - 0,60	0,60 - 0,30	0,30 - 0,15	
1	4-8	90 g	-	-	-	-	
2	8-16	-	90 g	-	-	-	
3	16-30	-	-	90 g	-	-	810 g
4	30-50	-	-	-	90 g	-	
5	50-100	-	-	-	-	90 g	

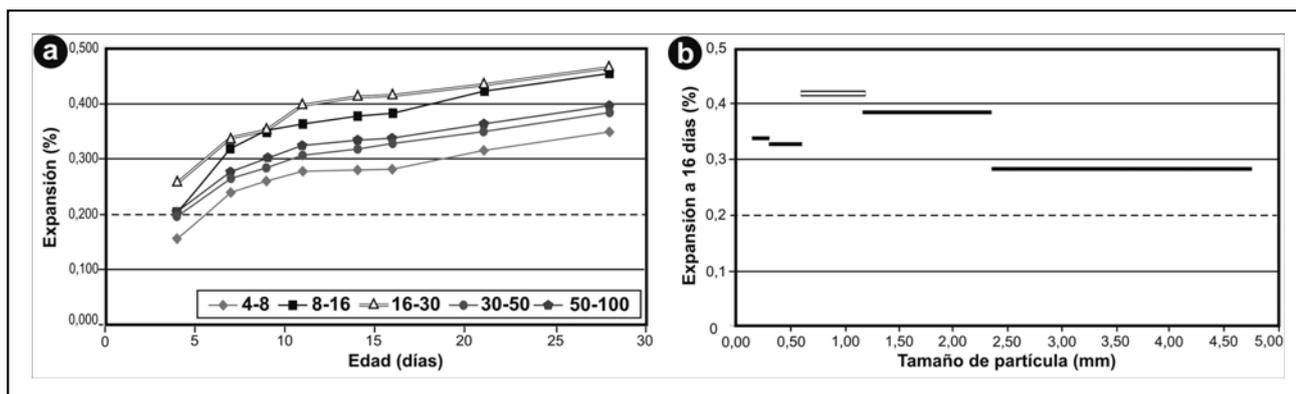


Figura 2. (a) Expansión de morteros en el tiempo. (b) Influencia del tamaño de partícula.

Petrografía de la arenisca:

Bajo lupa binocular la arenisca rojiza carece de estructuras sedimentarias (Figura 4A), granulométricamente homogénea, bien cementada y posee venillas de calcita.

La descripción microscópica de la sección delgada permite definirla como una arenisca cuarzosa constituida por abundantes clastos redondeados a subredondeados, de granulometría gruesa a media (0,8 a 0,2mm), de cuarzo límpido, cuarzo policristalino de secciones circulares y alargadas de origen metamórfico y de cuarzo microcristalino, con características tipo chert, con un alto grado de redondeamiento, escasos granos de feldespatos alcalinos y pastas de rocas volcánicas síliceas. La roca también se observa constituida por clastos subangulosos a subredondeados de cuarzo y feldespatos, a los que se agregan escasos granos de circón, apatito, opacos (hematita) y láminas micáceas de granulometría fina a muy fina (0,2 a 0,07mm) hasta limosa (inferiores a 0,07mm). El cemento de la roca está constituido principalmente por cuarzo microcristalino, ópalo y por una combinación de ópalo y calcedonia en sectores localizados del corte (Figura 3).

Petrografía de las barras de mortero:

Bajo lupa binocular se observa, en la superficie de las barras confeccionadas con las fracciones de la arenisca “de Chaco” 4-8 y 8-16, abundantes fisuras muy marcadas, mientras que en las barras realizadas con la granulometría 16-30 se detectan microfisuras que conforman pequeñas redes en sectores localizados y en las probetas confeccionadas con las fracciones 30-50 y 50-100, se identifican pequeñas redes de microfisuras.

Cabe aclarar que en la observación petrográfica de un hormigón o mortero se describen sus partes constituyentes: el agregado y las posibles modificaciones que a este le ocurra, la pasta de cemento, tanto su composición como sus afecciones (poros, fisuras, etc.) y la interfase, que es el límite o zona de transición entre el agregado fino o grueso y la pasta de cemento (ASTM C 856, 2008). El material neoformado producto de la RAS es un gel (amorfo) sílico-alcalino, que bajo microscopio óptico de polarización a nicols paralelos es incoloro o castaño y a nicols cruzados es isótropo o puede presentarse iluminado por la presencia de cristales de calcita.

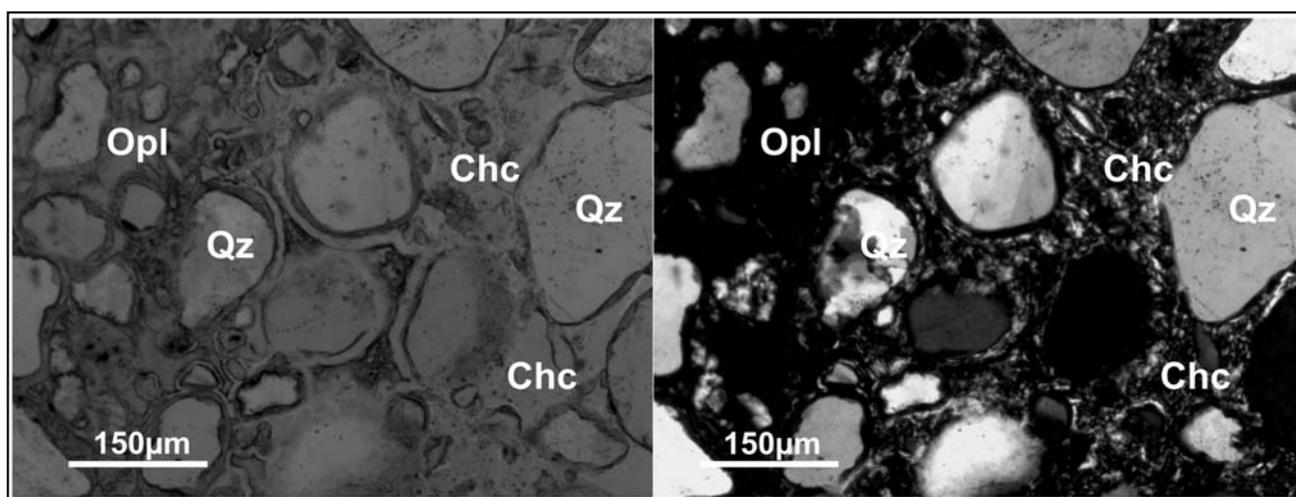


Figura 3. Fotomicrografías de la arenisca de la Formación Las Piedritas a nicols paralelos y a nicols cruzados. Partículas de cuarzo (Qz); ópalo (Opl) y calcedonia (Chc). Simbología de los minerales tomada de Chace (1956), Whitney y Evans (2010).

En base a lo expresado en el párrafo anterior se han realizado observaciones de secciones tomadas de las probetas. En ellas, en especial las conformadas por las fracciones granulométricas mayores, la arenisca de trituración presenta importantes modificaciones del material cementante original de la roca (ópalo y calcedonia), el cual puede perderse o estar total o parcialmente reemplazado por material de la RAS (gel) de color blanco o blanco amarillento. Las interfases de las partículas de arenisca con la pasta de cemento del mortero están afectadas por microfisuras y gel de reacción. En general, la pasta de cemento de las probetas se observa sin mayores cambios, detectándose en todas ellas poros, en su mayoría de sección circular y rellenos de gel producto de la RAS. (Figura 4B, C y D).

Bajo microscopio óptico de polarización se observan con mayor detalle los rasgos deletéreos y componentes neoformados (geles) producto de la reacción álcali agregado, analizándose en profundidad las secciones delgadas de los morteros confeccionados con las fracciones granulométricas 4-8 (4,75 - 2,36mm), 16-30 (1,18 - 0,60mm) y 50-100 (0,30 - 0,15mm). En las descripciones obviaremos a la arena natural (cuarzo feldespática) no reactiva y a los componentes de la pasta de cemento.

Corte I: En la sección correspondiente a la barra confeccionada con la fracción 4-8, el agregado en estudio (arenisca de la formación Las Piedritas), presenta modificaciones importantes, como es la pérdida y/o reemplazo del material cemen-

tante de los granos de cuarzo de la arenisca, observándose cavidades o presencia de gel de RAS en su lugar (Figura 5A). En la pasta de cemento se observan importantes fisuras algunas de ellas con una apertura de aproximadamente $75\mu\text{m}$ (Figura 5B) las cuales pueden ser de varios milímetros y afectar a las interfases pasta-agregado. En la mayoría de los casos las fisuras se encuentran rellenas con gel de RAS, que puede apreciarse como un material incoloro o castaño y al cruzar polarizadores se mantiene isótropo (amorfo) o pobremente cristalino con muy baja birrefringencia. También se observan varias interfases pasta-agregado afectadas por fisuras y/o geles de reacción e irradian de la arenisca, se extiende por la pasta y están rellenas con gel (Figura 5B). Es importante la presencia de poros de secciones circulares, en general inferiores a los 2mm con geles de RAS en su interior, presentes en la pasta de cemento y en general relacionados a fisuras (Figura 5C-D).

Corte II: En el corte correspondiente al mortero con la fracción 16-30, las modificaciones en la arenisca son menos marcadas debido a un menor tamaño de grano de la fracción utilizada, aunque se identifican varios granos de la arenisca con pérdida del material cementante (Figura 5G) o reemplazado por geles de RAS (Figura 5F-G-H). También se detectan fisuras que tienen origen en la arenisca y están rellenas con gel, pero estas son de menor apertura que las observadas en el corte anterior (Figura 5E). Los poros rellenos con el gel son abundantes

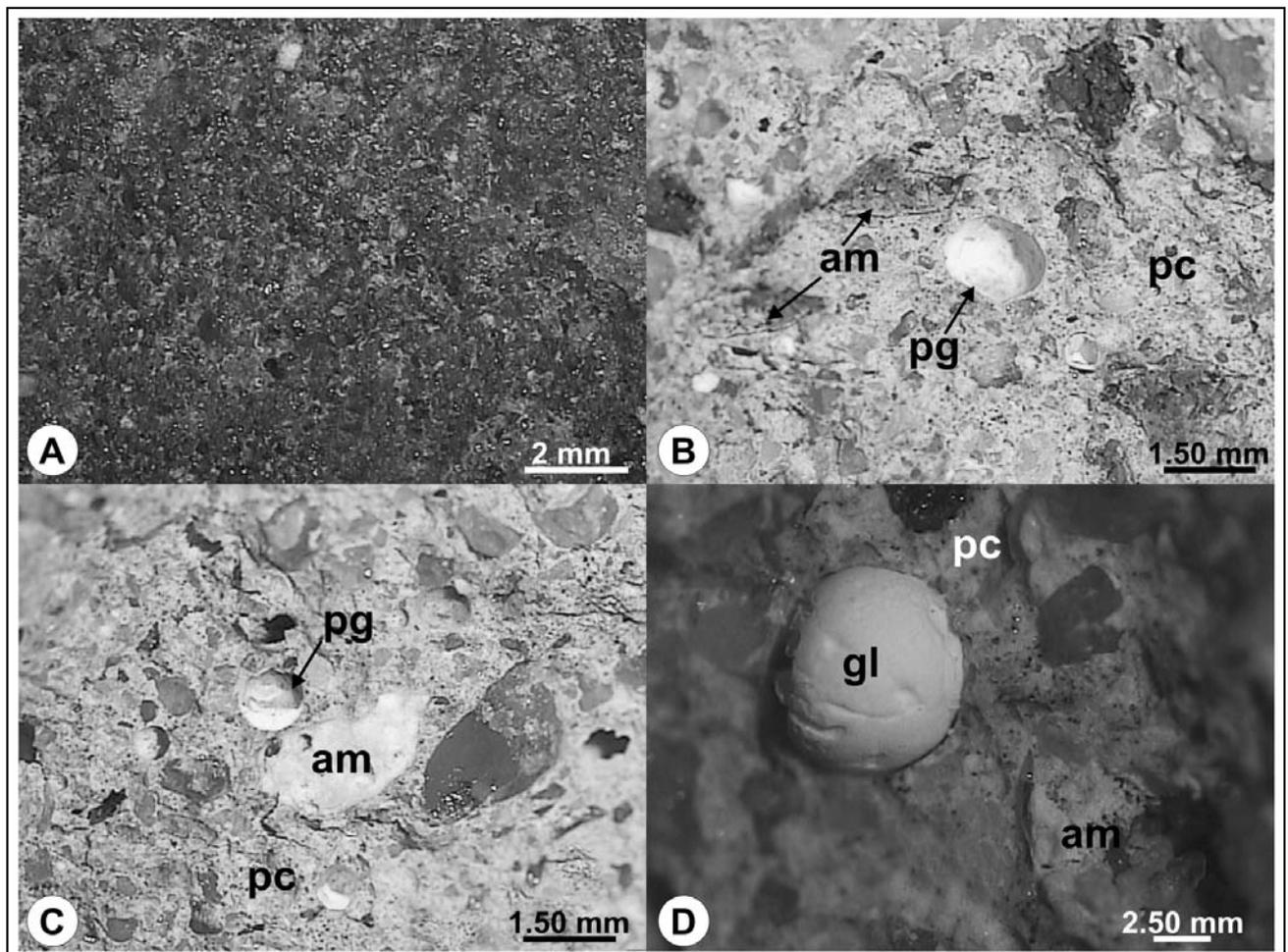


Figura 4. Fotografías tomadas bajo lupa. (A) Arenisca de la Formación Las Piedritas. (B, C y D) Mortero y en él se señala: arenisca modificada (am), la pasta de cemento (pc), poros con gel (pg) y el gel (gl).

(Figura 5E-F) y en muchos casos se hallan en la interfase pasta-agregado (Figura 5F). A nicoles cruzados, la pasta de cemento se observa isotrópica debido a la presencia del citado material de reacción.

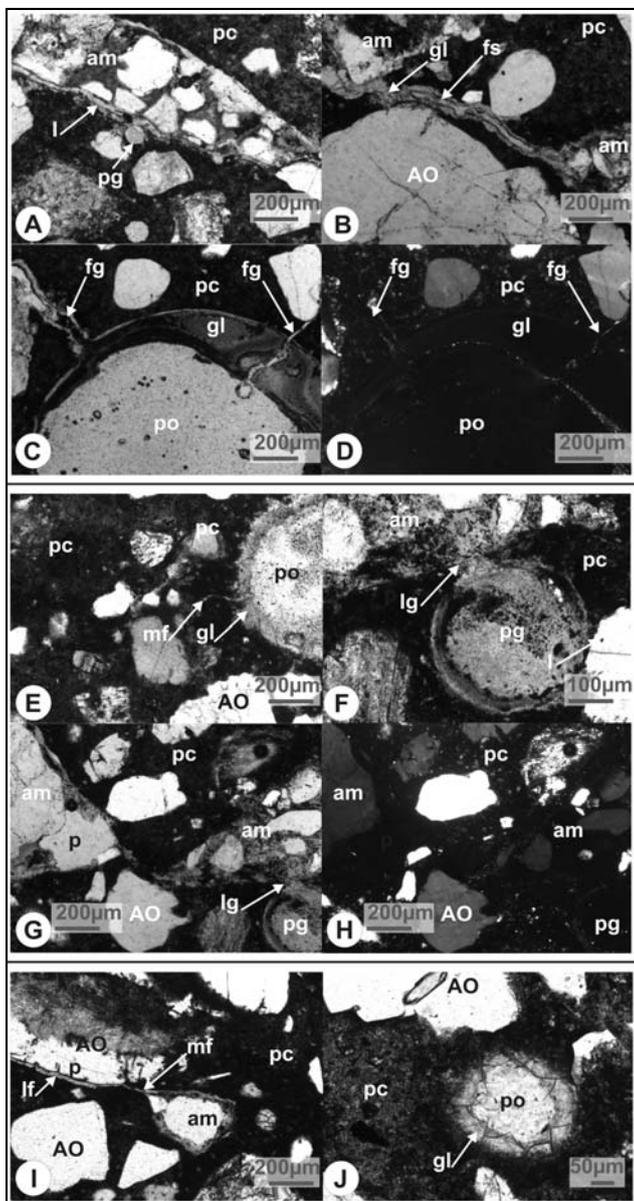


Figura 5. Fotomicrografías de los cortes delgados de los morteros. Se indica, arena oriental (AO) no reactiva, arenisca modificada (am), pasta de cemento (pc), poros (po), porosidad en la roca (p), poros rellenos de gel (pg), interfase pasta-agregado (I), interfase fisurada (If) e interfase con gel (Ig), fisuras (fs), fisuras con gel (fg), microfisuras (mf) y gel (gl) producto de la RAS.

Corte III: El tercer corte analizado corresponde al mortero con la fracción de menor tamaño de partícula (50-100). Los granos de cuarzo que formaban parte de la arenisca han sido "liberados" o separados del cemento silíceo de la roca, por lo tanto la modificación del agregado no es tan evidente y se pueden observar algunos cambios significativos en los bordes de los granos de cuarzo donde aún conservan adheridos parte del material cementante de la roca (Figura 5I) o en trozos de agregado que corresponden únicamente al cemento silíceo de la arenisca. En la pasta de cemento se identifican abundantes microfisuras de espesor inferior a 10µm y de extensiones menores a 5mm (Figura 5I). El gel de reacción se observa relleno de poros (Figura 5J), fisuras, impregnando a la pasta de cemento y reemplazando totalmente a ciertos fragmentos de agregado reactivo.

CONCLUSIONES

1. Petrográficamente se clasifica a la arenisca en estudio como un agregado potencialmente reactivo frente a los álcalis del cemento portland debido a que mineralógicamente posee una proporción de ópalo y calcedonia mayor al 5%, límite especificado por el reglamento *CIRSOC 201 (2005)*.
2. En los gráficos se aprecia que las expansiones en los morteros son mayores, en todos los casos, al valor máximo establecido por la norma *ASTM C 1260 (2008)* y que el efecto de "pessimum" ocurre para la fracción granulométrica comprendida entre el tamiz IRAM 1,18mm y 0,60 mm.
3. La reactividad alcalina potencial del agregado en estudio queda confirmada por el análisis petrográfico-microestructural de los cortes delgados de las barras, observándose importantes rasgos deletéreos propios de RAS tanto en la arenisca de trituración como en la pasta de cemento. Entre estos rasgos se enumeran: abundantes fisuras en la pasta de cemento y en las interfaces pasta-agregado rellenas por gel de RAS y abundantes poros en la pasta de cemento rellenos también por material de la reacción.
4. Por último, desde el punto de vista del análisis petrográfico y microestructural, podemos decir que el efecto de "pessimum" en la barra de mortero confeccionada con la fracción 16-30 no genera los rasgos deletéreos más significativos, por el contrario, estos se aprecian mejor en las barras constituidas con las fracciones granulométricas mayores en donde las fisuras y poros con geles de reacción son de mayor tamaño. Por lo tanto, esta última mención será objeto de análisis en futuros trabajos.

AGRADECIMIENTOS

Al personal del Área Durabilidad del Hormigón, Liganes Hidráulicos y Adiciones Minerales del LEMIT por su dedicación y esfuerzo en la realización de los ensayos.

La segunda autora agradece al Licenciado Norberto J. Uriz por la realización y diseño especial para el presente trabajo del mapa ubicación de la cantera Las Piedritas.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASTM C 856.
Standard practice for petrographic examination of hardened concrete.
2008 Annual Books of ASTM Standards. Concrete and Aggregates. Section Four Construction. Vol. 04.02: 438-454.
- ASTM C 295.
Standard guide for petrographic examination of aggregates for concrete.
2008 Annual Books of ASTM Standards. Concrete and Aggregates. Section Four Construction. Vol. 04.02: 199-206.
- ASTM C 1260.
Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (Mortar-Bar Method).
2008 Annual Books of ASTM Standards. Concrete and Aggregates. Section Four Construction. Vol. 04.02: 677-681.
- ASTM C 1293.
Standard test method for determination of length change of concrete due to alkali-silica reaction.
2008 Annual Books of ASTM Standards. Concrete and Aggregates. Section Four Construction. Vol. 04.02: 682-688.
- BATIC O.R., SOTA J.D. Y IASI R., 1990.
Contribution of alkalis by aggregates to alkali-aggregates reaction in concrete.
En Erlin/stark (ed.), Petrography applied to concrete and concrete aggregates, ASTM STP 1061. American Society for Testing and Materials, pág. 159-168.
- BATIC, O.R., Y SOTA, J.D., 1991.
RAS. Influencia de las variables de exposición de las barras de mortero.
10ª Reunión técnica Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Tomo II: 89-93.
- BATIC, O.R., CORTELEZZI, C.R., PAVLICEVIC, R. Y TRAVERSA, L.P., 1995.
Caracterización tecnológica de las areniscas cementadas con calcedonia y ópalo del noroeste de la provincia del Chaco, República Argentina.
XII Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Memorias, pág. 191-197.
- BATIC, O.R. Y SOTA, J.D., 2001.
Reacciones deletéreas internas.
En E. Irassar (ed.), Durabilidad del Hormigón Estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, pág. 157-216.
- BÉRUBÉ, M.A. Y FOURNIER, B., 1993.
Canadian experience whit testing for alkali-aggregate reactivity in concrete.
Cement and Concrete Composites. Vol. 15: 27-47.
- CHACE, F.M., 1956.
Abbreviations in field and mine geological mapping.
Economic Geology, Vol. 51: 712-723.
- CIRSOC 201, 2005.
Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.
Capítulo II: 19-40
- COELHO DOS SANTOS, G.S. Y FALCONE, D.D. 2012.
Reacción álcali-agregado en areniscas cuarzosas de la Formación Las Piedritas (Chaco) y cuarcitas de la Formación Balcarce (Buenos Aires), utilizadas como agregados para hormigón.
Resúmenes. XII Reunión Argentina de Sedimentología, pág. 53-54.
- COLINA, J.F., WAINSTEIN, M. Y BATIC, O.R., 1967.
Durabilidad de hormigones de cemento portland. Separata de la Revista de Ingeniería N°57.
Revista Técnica del LEMIT. Serie II, N°115, 23 p.
- CORTELEZZI, C.R., MAIZA, P. Y PAVLICEVIC, R., 1990.
Strained quartz in relation to alkali-silica reaction. In Erlin/stark (ed.),
Petrography applied to concrete and concrete aggregates, ASTM STP 1061. American Society for Testing and Materials, pág. 145-158.
- CORTELEZZI, C.R., PAVLICEVIC, R. Y SOTA, J.D., 1991.
El cuarzo tensionado de un agregado natural frente a la RAS.
10ª Reunión técnica Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Tomo II: 80-88.
- FALCONE, D.D., BATIC, O.R. Y SOTA, J.D., 2006.
La humedad es necesaria para la RAS. En J.D. Sota (ed.),
16ª Reunión Técnica Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, pág. 241-248.
- FAVA, A.S.C., MANUELE, R.J., COLINA J.F. Y CORTELEZZI, C.R., 1961.
Estudios y experiencias realizadas en el LEMIT sobre la reacción que se produce entre el cemento y los agregados en el hormigón de cemento Portland.
Revista Técnica del LEMIT. Serie II N° 85, 40 p.

- GRATTAN-BELLEW, P.E., 1989.
Test Methods and Criteria for Evaluating the Potential Reactivity of Aggregates.
8th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, session 3, 279-194, Kyoto.
- HANSEN, W.C., 1944.
Studies relating to the mechanism by which the AAR proceeds in concrete.
Journal of American Concrete Institute. Vol. 15, No 3: 213-227.
- IRAM 1637, 1992.
Reacción Álcali-Agregado.
Método de la barra de mortero para la determinación de la reactividad alcalina potencial, 18 p.
- IRAM 1674, 1997.
Agregados.
Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero, 14 p.
- IRAM 1700, 1997.
Agregados.
Determinación del cambio de longitud en prismas de hormigón debido a la reacción álcali-agregado, 16 p.
- KODAMA, K. Y NISHINO, T., 1987.
Observation around of cracked region due to alkali-aggregate reaction by analytical electron Microscope.
7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, session XI, 398-402, New Jersey, USA.
- MARFIL, S., BATIC, O.R. Y MAIZA, P., 2012.
Petrography of potentially alkali reactive sandstone from Argentina.
14th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions (ICAAR), Texas (USA).
Publicado en CD, versión en formato PDF, 021311-MARF, 8 pag.
- PERI, V.G. Y ROSSELLO, E.A. 2010.
Anomalías morfoestructurales del drenaje del Río Salado sobre las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco) detectadas por procesamiento digital.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 66 (4): 634 - 645.
- SIMS, I. Y NIXON, P., 2003.
RILEM Recommended Test Method AAR-1.
Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - petrographic method. Materials and Structures. Vol. 36: 480-496.
- WHITNEY, D.L. Y EVANS, B.W., 2010.
Abbreviations for names of rock-forming minerals.
American Mineralogist, Vol. 95: 185-187.
- ZHANG, C., WANG, A., TANG, M., WU, B. Y ZHANG, N., 1999.
Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion.
Cement and Concrete Research, 29: 1393-1396.



Influencia del agrietamiento en la resistencia al corte de una arcilla de alta plasticidad

Cracking influence in the shear resistance of a high plasticity clay

Chávez Negrete, Carlos¹ ✉ - Cervantes Navarro, David¹⁻² - Arreygue Rocha, Eleazar¹ - Alarcón Ibarra, Jorge¹

Recibido: 27 de Setiembre de 2012 • Aceptado: 09 de Abril de 2013

Resumen

En la mecánica de suelos clásica, el suelo se toma como un continuo. Esta condición no siempre es válida, en un gran número de ocasiones el suelo en estado natural se ve afectado por grietas que afectan su comportamiento mecánico. En estos casos no se pueden obtener muestras inalteradas para realizar una caracterización mecánica, por lo que se deben reconstituir en el laboratorio muestras con el mismo peso volumétrico que en el campo, teniendo el inconveniente que no están agrietadas. Esto limita el entendimiento del comportamiento del suelo en estado natural y no se estima su resistencia adecuadamente.

En el presente artículo se describe una nueva técnica experimental para estudiar los suelos altamente plásticos y susceptibles al agrietamiento, sometidos a ensayos de corte directo. Se utilizó un suelo representativo de la zona de Morelia, ensayándolo a corte directo (consolidado no drenado) en condiciones sin agrietamiento, agrietamiento parcial y total. La técnica resultó adecuada y se pudo ver como el agrietamiento disminuye la cohesión y aumenta el ángulo de fricción interna. Además se observó que cuando el suelo se somete a esfuerzos normales pequeños, se propaga la grieta rápidamente impidiendo que se desarrolle la resistencia, y existe una falla súbita. Por último, los resultados se analizan tomando en cuenta sus consecuencias en la estabilidad de taludes.

Palabras Clave: Resistencia al corte, Agrietamiento, Arcillas de alta plasticidad, Estabilidad de taludes.

Abstract

In classical soil mechanics, soil is taken as a continuum. This condition is not always valid, in a number of occasions the ground in its natural state is affected by cracks that affect their mechanical behavior. In these cases cannot obtain undisturbed samples for mechanical characterization, therefore are usually reconstituted at the laboratory, samples with the volumetric weight of the field, with the drawback that they are not

1. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

✉ cachavez@umich.mx

2. Posgrado en Infraestructura del Transporte, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

cracked. This limits the understanding of soil behavior *in situ* and not properly estimated its strength. This paper describes a new experimental technique for studying highly plastic soils susceptible to cracking under direct shear tests. It was tested a representative soil from Morelia, Mexico area, to direct shear (consolidated undrained) in conditions without cracking, crazing partial and total. It was developed a new technique to produce a partial and total crack taking care to alter as little as possible the sample. The technique was adequate and the results show that as cracking length increases, the cohesion decreases and increases the angle of internal friction. It was also observed that, when the soil is subjected to small normal stresses the crack propagates, avoiding the development of strength and sudden failure is presented. Finally the results are discussed taking into account their impact on slope stability.

Keywords. *Shear Strength, Cracking, Clays of high plasticity, Slope stability.*

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo consiste en conocer el comportamiento mecánico de un suelo arcilloso agrietado, mediante la obtención de la resistencia máxima y post-pico, utilizando el equipo de corte directo. El agrietamiento de las arcillas se forma de manera natural por expansiones y contracciones que se provocan con los cambios de contenido de humedad a lo largo del año; estas arcillas suelen ser rígidas y agrietadas (Duncan y Wright, 2005). Al paso de los años se establece un patrón de agrietamiento natural, que se establece como una condición de equilibrio.

Otro mecanismo en el cual se genera un agrietamiento natural es en los suelos residuales, en el cual el agrietamiento se hereda de los macizos rocosos que dieron origen al suelo, solo que en el suelo estas estructuras no son visibles a simple vista.

Las excavaciones en corte que se realizan en la construcción de carreteras o edificaciones en suelos agrietados, generan inestabilidades de los taludes como consecuencia de estas zonas de debilidad (Figura 1). De acuerdo a lo anterior son dos los mecanismos que propician o detonan la inestabilidad en arcillas agrietadas: el incremento de la presión de poro y la propagación de las fisuras existentes. El agrietamiento produce una permeabilidad secundaria alta (Rayhani et al 2008), como consecuencia se presentan aumentos repentinos de las presiones de poro. Las grietas son zonas débiles en donde se concentran los esfuerzos sobre todo al final de la fisura, si se altera el equilibrio (cambio de esfuerzos) se inicia una propagación de la fisura (Duncan y Wright, 2005); la unión de un gran número de fisuras tiene como origen una zona debilitada propensa a la localización de la superficie de deslizamiento (Figura 2).

En el presente artículo se muestran los resultados de varios ensayos de corte directo en una arcilla de alta plasticidad de la zona de Morelia Michoacán, México, en la cual se generaron grietas para poder estudiar su comportamiento. Se analizan los resultados y se presentan conclusiones en base a condiciones de estabilidad de taludes en suelos agrietados.

Comportamiento de arcillas agrietadas

El agrietamiento complica el muestreo de las arcillas, en el caso que se logre labrar una muestra y la dirección de la muestra sea representativa de la dirección en la que se presenta el corte en campo, los resultados de un ensayo serían representativos. En el caso contrario, en el que se labrara una muestra sin grietas se sobreestimaría la resistencia. En las pruebas en muestras reconstituidas se pierde la estructura original del suelo y cuando se ensaya se obtiene una resistencia pico, que en la realidad

la arcilla agrietada no es capaz de soportar (Skempton 1964). Lo anterior conduce a la realización de análisis de estabilidad erróneos donde se puede presentar una falla.

Observaciones realizadas en varios casos de deslizamiento de taludes por Skempton (1964), condujeron a la conclusión, que la presencia de fisuras conducen a una falla progresiva y la resistencia va disminuyendo hasta un valor residual. Skempton (1964) observó que la resistencia de la primera falla de estabilidad en arcillas agrietadas no corresponde a la resistencia pico del suelo, sino a una reducida (resistencia post-pico, Figura 3), y demostró que el agrietamiento en los suelos juega un papel importante en el reblandecimiento de la arcilla. En las arcillas de Londres se han llegado a detectar disminuciones de la resistencia por causa del agrietamiento hasta valores residuales (Figura 3).

También se ha demostrado que una envolvente pico de falla de una prueba reconstituida, en donde se partió de arcillas de un alto contenido de humedad y se consolidó a un esfuerzo efectivo de campo, sirve para estimar la resistencia de las arcillas agrietadas (Skempton, 1970). Ya que los contenidos de agua que se presentan en la falla, son similares.

En el contexto de la mecánica de suelos se suele estudiar el suelo como un continuo, y la presencia de agrietamiento es difícil de tomar en cuenta. En el caso común de agrietamiento vertical de la parte superior de los taludes, se suele tomar una resistencia al corte nula (Duncan y Wright, 2005); pero si se trata de arcillas con grietas a mayor profundidad con un patrón definido distinto, es difícil de cuantificar su resistencia.

DESCRIPCIÓN DEL SUELO UTILIZADO Y METODOLOGÍA DE ENSAYOS

El material fue extraído de una de las caras del talud de corte, de la carretera de acceso al nuevo recinto ferial (Ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán, México, ver Figura 4), a un lado del entronque del acceso norte a Tres Marías. En la zona se presentaron varios deslizamientos de taludes en arcillas agrietadas cuando se estaban realizando las excavaciones en corte para la construcción de una carretera (ver Figura 1). En la Figura 5 se muestra una fotografía del material en estado natural, en condiciones húmedas y secas (durante el muestreo). En la imagen del lado izquierdo se observa claramente una estructura granular delimitada por grietas, del lado derecho en estado seco se muestra grumos de arcilla con patrón de agrietamiento bien marcado. Debido al agrietamiento no se pudo obtener una muestra inalterada, por lo que se realizó un muestreo alterado.



Figura 1. Rotura de talud en arcillas agrietadas, localizado en el par vial de Tres Marías, Morelia Michoacán, México.

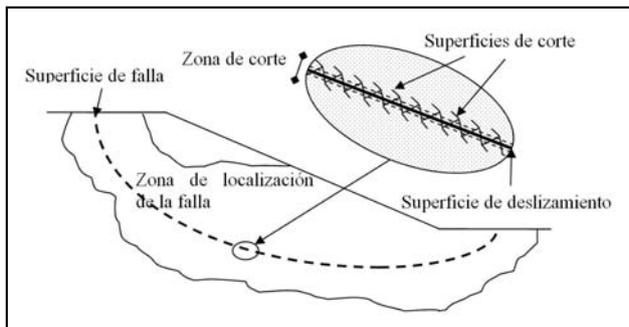


Figura 2. Zona debilitada, zona de corte y superficie de deslizamiento, modificada a partir de Leroueil (2001).

Al suelo se le practicaron los ensayos básicos para su identificación (Límites de consistencia, *ASTM D3282*), determinación de peso específico seco máximo y humedad óptima de compactación (energía estándar de compactación, *ASTM D698*) y densidad relativa de los sólidos. En especial los resultados de la prueba de compactación Proctor fueron útiles para el remoldeo de los especímenes a ensayar. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades índice del suelo estudiado

Propiedad	valor
Límite Líquido, LL	137 %
Límite Plástico, LP	54 %
Contracción Lineal, CL	30 %
Contracción Volumétrica, CV	21%
Clasificación SUCS	CH
Densidad relativa de los sólidos, S _s	2,745
Peso específico seco máximo, γ_d	10,61 kN/m ³
Humedad óptima, w	45%

Los valores de los límites de consistencia nos dan una idea del comportamiento del suelo, en este caso se espera que se tenga un ángulo de fricción efectivo bajo (10°), además de que se tenga una compresibilidad alta ($C_c=1,1$), valores típicos de una arcilla montmorillonítica (*Mitchell y Soga, 2005*).

Método de inducción de la grieta

Para poder realizar ensayos con muestras agrietadas se ideó un método que produjera el menor daño a la muestra. Después de probar varios métodos se eligió el más replicable. El procedimiento consiste en: reconstituir la muestra al peso específico obtenido del ensayo Proctor mediante compactación estática, posteriormente la muestra se labra, se monta en el equipo de corte directo y se le aplica una carga normal con la que se deja consolidar, posteriormente se sigue el procedimiento para la generación de la grieta. El método consiste en: engrasar el interior de la placa superior de la caja de corte directo, con la finalidad de que cuando se levante la placa ésta se deslice mucho más fácil; para poder levantar la placa, se giran media vuelta los tornillos de sujeción y los tornillos auxiliares de la caja de corte lo más exacto posible, con el propósito de introducir una cuerda de guitarra metálica (con diámetro aproximado de 0,275 mm). Una vez que se introduce la cuerda entre las placas y está sensiblemente en contacto con la muestra, se tensa en ambos extremos, para generar un movimiento alternado lateral para inducir el corte hasta aproximadamente la mitad de la muestra. Pero en realidad solo se realiza un corte en una tercera parte de la muestra, debido a la curvatura de la cuerda. Finalmente se retira la cuerda, los tornillos de sujeción y auxiliares, para poder proseguir con la etapa de corte del ensayo.

Ensayos de Corte Directo

Se realizaron ensayos de corte directo consolidados no drenados (CU, de sus siglas en inglés) en los especímenes de arcilla utilizando la metodología de la norma Española UNE103401. Se efectuaron ensayos con tres condiciones distintas: a) un ensayo sin grieta, que sirvió de referencia; b) ensayo con una longitud de grieta de aproximadamente 200 mm; y c) ensayo con una grieta que abarcaba toda la muestra.

Las muestras se ensayaron a tres distintos esfuerzos normales: 40,11, 60,21 y 80,22 kPa. Estas fueron sometidas a la consolidación en un tiempo de 24 h (tiempo en el cual se observó que se presentaba el 100% de la consolidación primaria) y se realizó el corte a una velocidad tal que se produjera la falla en un tiempo entre 15 y 20 minutos, dada la permeabilidad de la arcilla se produjo el corte sin drenaje.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS DE CORTE CU

Los resultados de los ensayos con grieta y con grieta parcial se muestran en la Figura 6 y Figura 7, donde se muestran las curvas esfuerzo deformación y las envolventes de falla, pico y post-pico. En la Tabla 2 se resumen los parámetros de la envolvente consolidada no drenada de Mohr-Coulomb, c_{cu} y ϕ_{cu} , que se obtuvieron en las tres condiciones ensayadas.

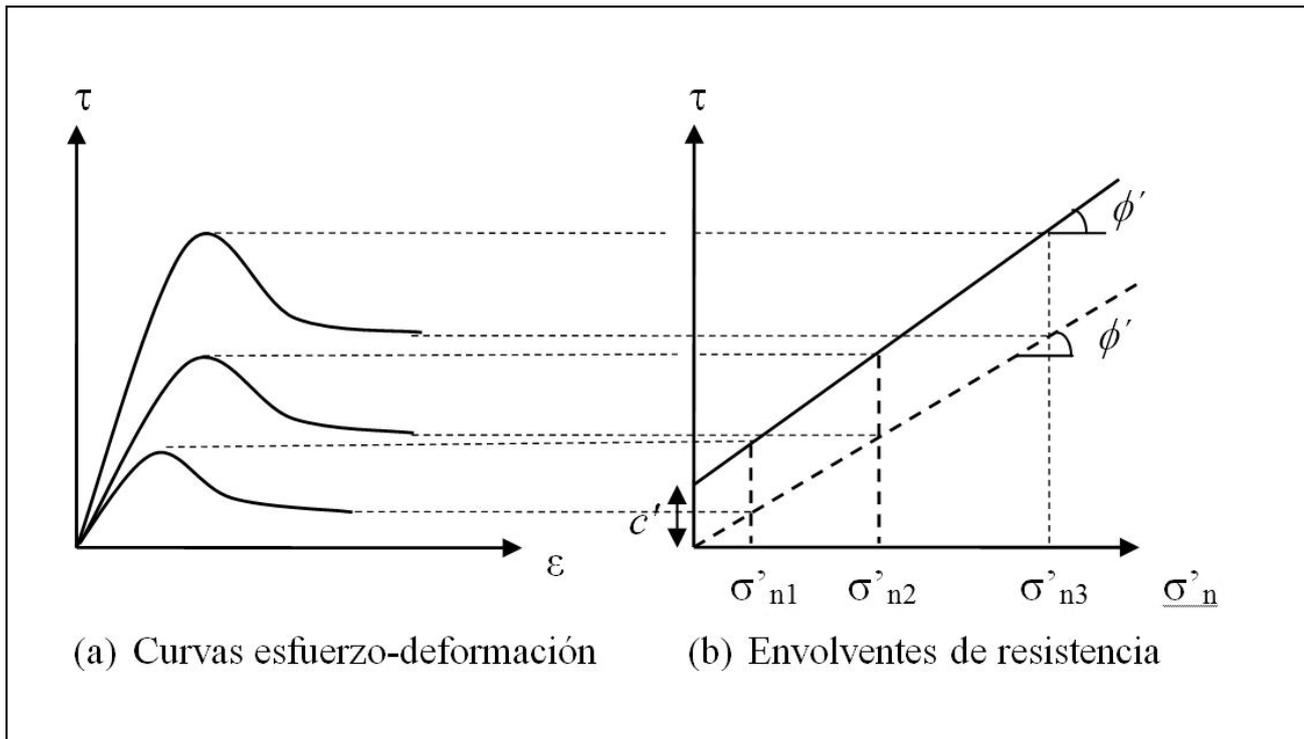


Figura 3. Envolventes de resistencia máxima y residual, Modificada a partir de Skempton (1964).

Tabla 2. Valores de cohesión y ángulo de fricción del suelo en los distintos ensayos.

Condición del Ensayo CU	Cohesión aparente (kPa)	ϕ_{cu} (°)
Sin grieta	38,25	13
Resistencia Post-Pico (sin grieta)	19,6	0
Con grieta parcial	0	42
Con grieta total	0	0

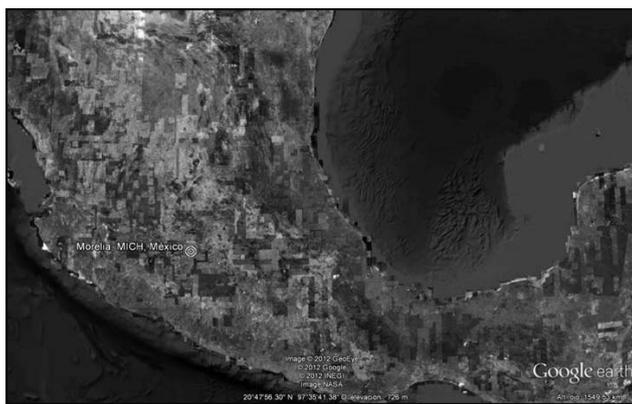


Figura 4. Localización de la ciudad de Morelia, Michoacán, México.

En la Figura 6 se muestran las curvas esfuerzo-deformación de las muestras ensayadas sin grietas. Se observa que la resistencia pico es proporcional al esfuerzo normal total aplicado, el esfuerzo cortante pico se presentó a una deformación aproximada de entre 1 y 1,5 mm. Posterior a la resistencia pico se

genera una disminución de la resistencia al corte de aproximadamente 60%, característica de los suelos altamente plásticos (Skempton 1964); la resistencia al corte post-pico parece ser independiente del esfuerzo normal total aplicado (19,6 kPa para los tres esfuerzos) y tiende a generar una envolvente post-pico horizontal. Para que se pudiera presentar una resistencia residual era necesario que se aplicara más deformación.

Las gráficas esfuerzo-deformación de las muestras con grieta parcial se presentan en la Figura 7. La envolvente de falla tiene mayor inclinación, debido a las resistencias menores obtenidas para los esfuerzos normales menores. En la muestra con un esfuerzo normal menor, la resistencia pico fue menor que la de la muestra sin grieta y se presenta una falla repentina por una propagación de la grieta a un esfuerzo de corte de 29,42 kPa, se debe de notar que no existe resistencia post-pico. La gráfica correspondiente al esfuerzo normal medio tiene una resistencia al corte máxima similar a la de la muestra sin grieta, en la resistencia post-pico, también se presenta una resistencia al esfuerzo cortante cercana a 29,42 kPa; en este caso si existe una caída de la resistencia post-pico de 40% aproximadamente, y se presenta la propagación de la grieta. La resistencia al corte pico de la muestra consolidada con esfuerzo normal mayor se incrementa en 9,8 kPa, respecto a la de la prueba sin grieta; para esta muestra la caída de la resistencia post-pico fue del 70% aproximadamente, disminuyendo hasta un esfuerzo de corte de 19,6 kPa, nótese que no se presenta la propagación de la grieta.

Por otro lado, se ensayó una muestra con una grieta que cubría toda la muestra, y los resultados mostraron una resistencia nula al esfuerzo cortante. De acuerdo al procedimiento seguido para la formación de la grieta, ésta se forma después de la consolidación y se rompe todo vínculo entre las paredes de

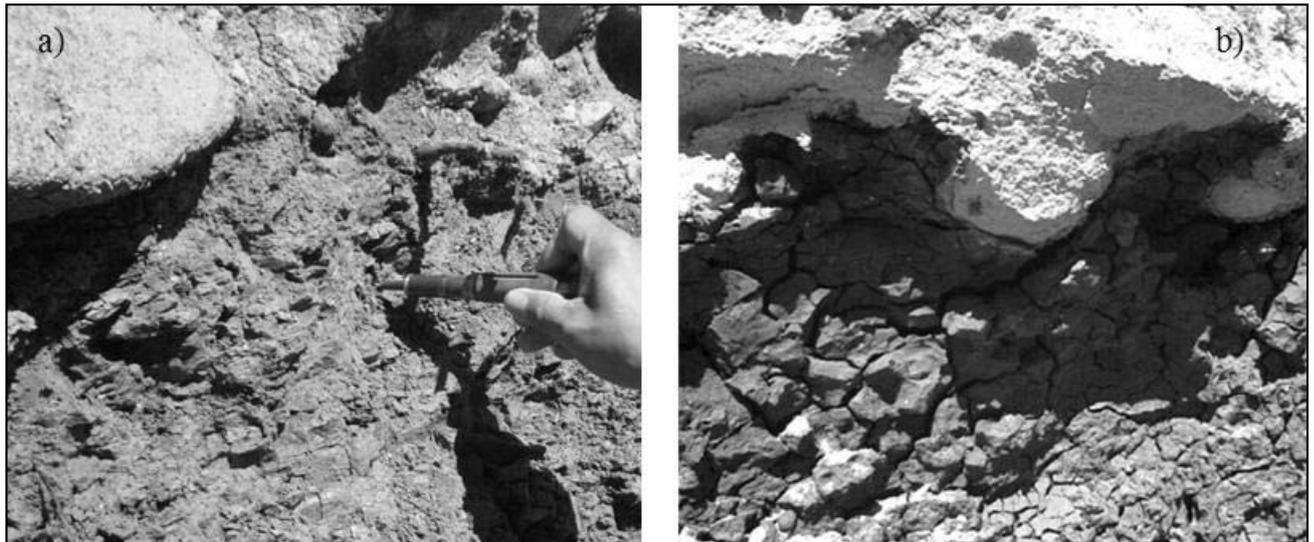


Figura 5. Fotografías de la arcilla en estado natural.

la arcilla en la grieta; además que existe agua que produce lubricación causando una resistencia nula.

El agrietamiento parcial causó caída de la cohesión aparente y se observó un aumento del ángulo de fricción interna, ϕ_{cu} , además de producir una propagación de la grieta para esfuerzos normales totales pequeños. El colapso repentino es la causa aparente de la caída de la cohesión aparente y el aumento del ángulo de fricción. El ensayo al corte con grieta en toda la muestra no presentó resistencia al corte. Por otro lado se detectó una resistencia post-pico de 19,6 kPa independiente al parecer del esfuerzo normal total, esta observación es válida para los casos donde no existió propagación de la grieta.

Aplicación de los resultados obtenidos en estabilidades de taludes

La aplicación de los resultados de los ensayos de corte directo consolidados no drenado con distintos grados de agrietamiento, se basa en la representatividad de situaciones reales. El ensayo de corte directo consolidado no drenado tiene dos etapas: la de consolidación y la de aplicación de un esfuerzo de corte en forma rápida, donde no se permite el drenaje. Cada ensayo se consolidó bajo distintos esfuerzos efectivos normales, que en la práctica corresponderían a distintas profundidades; es decir esta primera etapa permite reproducir el estado del suelo bajo distintas condiciones de consolidación. La segunda etapa mide la resistencia al corte aplicando el esfuerzo de una manera rápida, en la que no se permite la disipación de la presión de poro. Esta condición provoca que se presente un exceso de presión de poro que se va incrementando en la medida que se aplica el esfuerzo de corte, lo anterior induce que los esfuerzos efectivos sean menores a los totales. En la prueba de corte directo no se pueden medir las presiones de poro y lo que en realidad se obtiene es una envolvente de falla, desde el punto de vista de esfuerzos totales, con un ángulo de fricción sin drenaje, ϕ_{cu} , menor que el que se obtiene en una trayectoria de esfuerzos efectivos.

El ángulo de fricción representa la ganancia de resistencia del suelo por causa de la consolidación bajo distintos esfuerzos normales. La ganancia de resistencia al corte es proporcional

al incremento del esfuerzo de consolidación y la constante de proporcionalidad es tan ϕ_{cu} . En este caso hay que recordar que la velocidad de aplicación de carga fue rápida, lo que representa en campo una condición donde no se permitió el drenaje; en el caso de estabilidad de taludes, se trata de un talud excavado en un suelo arcilloso saturado, donde se evaluaría la resistencia a corto plazo, es decir un tiempo de cero hasta seis meses o hasta un año, dependiendo de la permeabilidad de la arcilla y la distancia que tenga que recorrer el agua para que se disipe la presión de está. La condición a largo plazo se evaluaría con una prueba consolidada drenada, para ello habría que realizar los ensayos correspondientes.

El ensayo sin grieta es representativo de dos condiciones en campo: La primera se trata de un talud en el cual no se presenta agrietamiento alguno y la segunda condición, la caída de resistencia después de la falla de un talud cuya superficie ya se definió (ver Figura 8, casos I y II). Para realizar un análisis de estabilidad de taludes desde el punto de vista de estados límite caso I, es necesario utilizar la envolvente de falla de Mohr-Coulomb, tomando en cuenta la resistencia pico. La segunda condición se presenta cuando el talud ya se ha desplazado y sobre pasa la resistencia máxima y se genera una superficie de deslizamiento; en el caso del material estudiado la resistencia pico llega a caer hasta un 60%. Si se presenta una gran deformación se debe de utilizar la resistencia residual que pudiera ser un poco menor que la post-pico. En el caso que existiera un deslizamiento de talud antiguo, el análisis de estabilidad de taludes se debería realizar con una envolvente de falla post-pico preferentemente la residual (ver Figura 8, caso II).

Además se contemplaron otros dos casos con agrietamiento natural: el primero sería el caso de una arcilla con grietas con una gran longitud y el segundo un agrietamiento moderado (ver Figura 8, casos III y IV, aquí se representa la orientación de las grietas más desfavorable). Los mecanismos de formación de las grietas para el caso III, serían un suelo residual en donde la roca que dio origen al suelo, tenía discontinuidades con una longitud bastante grande. En el caso IV sería la expansión y contracción de los suelos que daría lugar a una generación de un agrietamiento discontinuo, en suelos estratificados. En ambos casos la resistencia al corte se ve reducida principalmente la com-

ponente de la cohesión aparente. En el caso III la resistencia al corte es muy baja sobre todo cuando por ella se presenta un flujo de agua, de acuerdo al ensayo realizado, la resistencia sería nula lo que significaría en términos prácticos que el talud fallaría en el momento que se hiciera la excavación. En el caso IV de las grietas con longitud parcial, la parte de resistencia que se pierde (de acuerdo a los ensayos) es la de la cohesión aparente; por tanto la estabilidad del talud solo quedaría condicionada a la resistencia por fricción. Además debemos recordar que si las grietas son muy superficiales (suelo sujeto a un esfuerzo normal menor) las grietas se propagarían muy rápidamente y en las más profundas la resistencia si se desarrolla completamente y se presenta una resistencia post-pico que eventualmente sería residual (ver Figura 1 y Figura 7); lo que sugiere que la falla se iniciaría de la parte superior del talud a la parte inferior.

Para obtener de manera cuantitativa, en términos de factor de seguridad, el significado de la variación de los parámetros de la envolvente de falla, se presenta un análisis sencillo que se basa en los casos prácticos analizados previamente. En la Figura 9 se muestra la geometría de un talud con altura de 9 m y un con ángulo de inclinación de 61°. Tiene una sección crítica que corresponde a la inclinación del agrietamiento, que se supone de 39°; ésta se dejó fija para poder comparar los resultados. El análisis consistirá en evaluar el factor de seguridad de la estabilidad del talud en la sección por el método de Bishop, para simular las distintas condiciones solamente se cambian las envolventes obtenidas en las situaciones comentadas.

Tabla 3. Resultados de análisis de estabilidad de los casos prácticos

Caso	Envolvente	Factor de Seguridad
Caso I (sin grieta)	$\tau = 38,25 + \sigma \tan 13$	3,12
Caso II (post-pico)	$\tau = 19,6$	1,48
Caso III (grieta de gran long.)	$\tau = 5 + \sigma \tan 13$	0,65
Caso IV (agrietamiento Parcial)	$\tau = \sigma \tan 42$	1,06

En la Tabla 3, se muestran los resultados de los análisis de los casos prácticos discutidos, las envolventes utilizadas para el análisis y los factores de seguridad. El factor de seguridad para el caso I es de 3,12 (valor de referencia), que es el caso sin agrietamiento. El caso II, se toma la resistencia post-pico obtenida ya que no se tiene la residual, como la resistencia cae bastante, se ve reflejado en el factor de seguridad es de solo de 1,48 (47,51 % respecto al de referencia). En el caso IV se utilizó la envolvente obtenida del agrietamiento parcial y el factor de seguridad se redujo a 1,06 (33,94% respecto al de referencia). En el caso III longitud de la grieta mayor, se tomó una envolvente supuesta ya que el valor experimental fue nulo o no se pudo medir, dadas la condiciones se espera un ángulo de fricción bajo y que la cohesión prácticamente desaparezca; así que se mantuvo el ángulo de fricción de 13° del caso I y la cohesión se bajo a 5 kPa, con estos valores se puede notar que el factor de seguridad es menor de 1, que es una condición de falla.

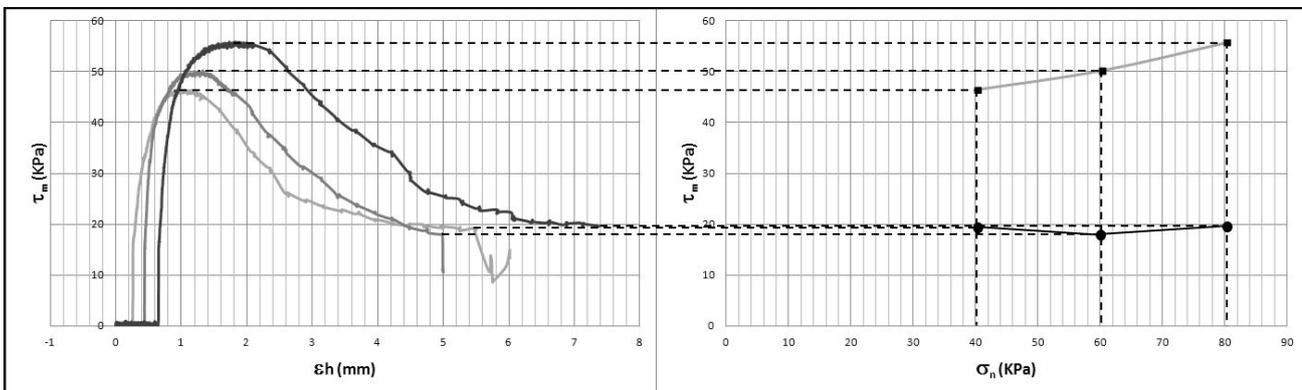


Figura 6. Gráficas esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo post-pico pruebas sin grieta, CU.

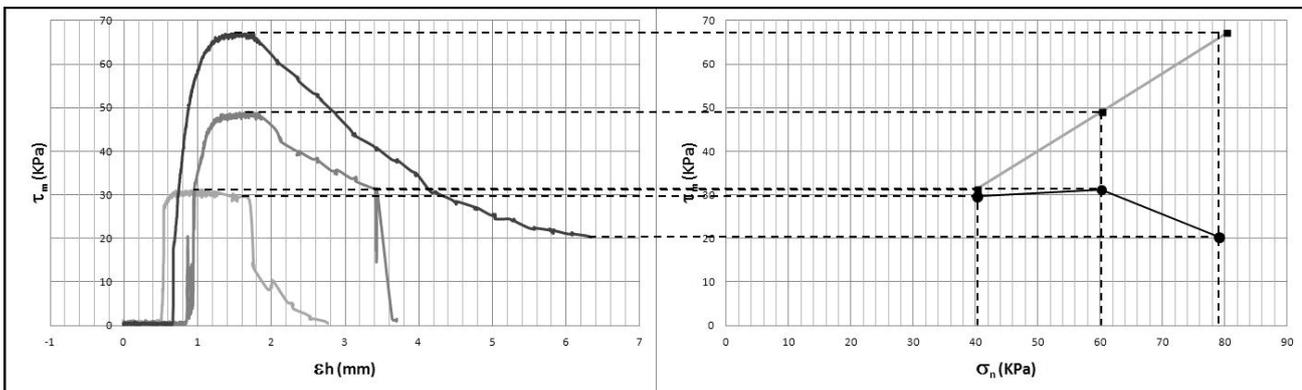


Figura 7. Gráficas esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo post-pico pruebas con grieta, CU.

CONCLUSIONES

Se realizaron ensayos de corte directo en una arcilla altamente plástica de la región de Morelia. Dada su susceptibilidad al agrietamiento no se pudieron obtener muestras inalteradas, y se decidió estudiar el material en condiciones remodeladas. Con el objetivo de estimar la influencia del agrietamiento en la resistencia al corte se ideó un procedimiento para generar una grieta en la muestra, que resultó exitoso.

Para poder ensayar el suelo en pruebas de corte directo consolidados no-drenados, este se reconstituyó el suelo al peso volumétrico seco máximo y contenido de humedad que resultó del ensayo Proctor con energía estándar. Se ensayaron muestras sin agrietamiento, con grieta parcial y grieta total.

Los resultados de los ensayos de las muestras sin grieta presentaron una envolvente pico con una $c_{cu} = 38,25$ kPa y un $\phi_{cu} = 13^\circ$, la envolvente post-pico resultó prácticamente horizontal con pérdida de resistencia hasta del 60%; con las deformaciones aplicadas no se alcanzó la resistencia residual. Estas envolventes se aplican al análisis de estabilidad de taludes tomando una condición a corto plazo, donde se considera la ganancia de resistencia por la consolidación. Las condiciones representativas de campo serían: el talud sin falla alguna y el talud fallado con superficie de deslizamiento predefinida (casos I y II, Figura 8).

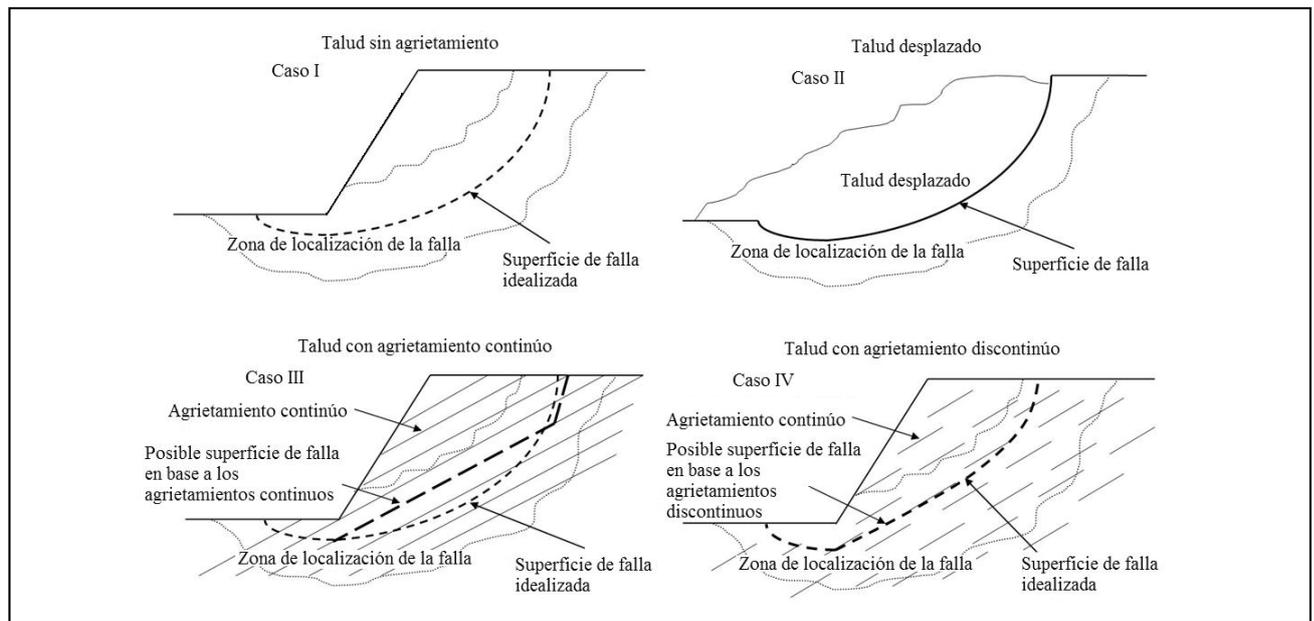


Figura 8. Análisis de resultados en base a 4 casos, tanto para CU como para CD.

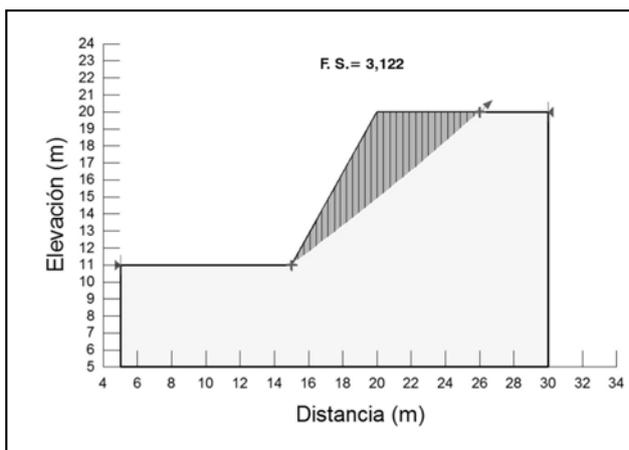


Figura 9. Análisis por estados límite de estabilidad de talud.

Los resultados de las pruebas con grietas parciales inducidas, muestran una envolvente de falla con una cohesión aparente nula y un ángulo de fricción no drenado de 42° , mayor que en la muestra sin grieta. Las curvas esfuerzo deformación de las muestras que están sometidas a pequeños esfuerzos normales, se presenta una repentina propagación de la grieta que no permite que la resistencia pico y post-pico se desarrolle; solo

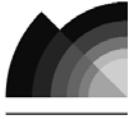
en el caso de las muestras con los esfuerzos normales altos se desarrollaron. Esta propagación de la grieta es la posible causa de la caída de la cohesión aparente y del aumento de ángulo de fricción, ya que esta caída propicia el giro de la envolvente. Además, esta información nos permite concluir, que en el campo el agrietamiento de las partes superficiales (con bajos esfuerzos normales) se propagará hacia las zonas bajas (de esfuerzo normal alto). En este tipo de suelos la caída de resistencia post-pico es notable, y para este caso disminuyó un 70% de su resistencia máxima, lo que provoca en un caso real que exista una disminución del factor de seguridad grande, una vez que la masa de suelo se desplaza.

El análisis cuantitativo de estabilidad de taludes realizado, tomó como referencia los casos prácticos presentados. Se observa que la influencia del agrietamiento y su longitud puede disminuir el factor de seguridad a menos del 33% de su valor original e inclusive si crece la longitud de la grieta hacer completamente inestable el talud. Por ello es importante tomar en cuenta el agrietamiento en los análisis de estabilidad de taludes.

Se necesitan más estudios desde el punto de vista de mecánica de la fractura para poder explicar el comportamiento de propagación de la fractura que se observó en los ensayos. Es claro que el agrietamiento tiene influencia en la envolvente de falla, entonces los ensayos de corte directo con grietas inducidas son una opción que busca la representatividad de las condiciones de campo, y así poder obtener parámetros más confiables.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ASTM D3282 - 09
Standard Practice for Classification of Soils and Soil-Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes.
ASTM International.
- ASTM D698-12
Standard. Test methods for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort
(12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)).
ASTM International.
- DUNCAN AND WRIGHT, 2005.
Soil strength and slope stability.
John Wiley and Sons. USA.
- LEROUEIL, S. (2001).
Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms.
Géotechnique, Vol. 51 No. 3:197-243.
- MITCHELL J. K, AND SOGA K, 2005.
Fundamentals of Soil behavior.
John Wiley & Sons. USA.
- NORMA UNE103401, 1998.
Determinación de los parámetros de resistentes al esfuerzo cortante de una muestra de suelo
en la caja de corte directo.
- RAYHANI M. H. T. 2008.
Physical modeling of desiccation cracking in plastic soils.
Engineering Geology, Vol. 97: 25-31.
- SKEMPTON, A. W. 1964.
Long-term stability of clay slopes. Fourth Rankine lecture.
Géotechnique, Vol. 14 No. 2:77-101.
- SKEMPTON, A. W. 1970.
First-time slides in over-consolidated clays.
Géotechnique, Vol. 20 No. 3:320-324



Utilização de geotecnologias para o zoneamento ambiental de bacias hidrográficas na região da serra da rapadura (Minas Gerais - Brasil)

Use of geotechnologies for environmental zoning of watersheds in the region of the serra da rapadura (Minas Gerais - Brazil)

Cerdeira Dias, Camila ¹ ✉ - Medeiros, Bruno ² - Biaggioni Quessada Gimenes, Filipe ³ - Amaral Faustino Magri, Rômulo ³

Recibido: 13 de Julio de 2012 • Aceptado: 13 de Abril de 2013

Resumen

El área de estudio comprende 5 cuencas hidrográficas ubicadas en la región de la Sierra de la Rapadura (Minas Gerais - Brasil), abarcando en total de 48,6 km². Concentrándose en el potencial relativo a actividades como minería, turismo y conservación ambiental; este trabajo hace uso de geotecnologías para realizar la zonificación del potencial de uso y ocupación del área de estudio. Para la subdivisión de esta área en regiones con diferentes potenciales de uso y ocupación, se elaboraron los mapas de fragilidad y restricciones ambientales. El mapa de fragilidad ambiental consideró aspectos relacionados al relieve o topografía, a la composición de los materiales del suelo y a las actividades de uso y ocupación actual del terreno. El mapa de restricciones ambientales clasificó el área en regiones vulnerables a la ocupación, con restricciones legales y áreas sin restricciones, considerando límites relativos a la fragilidad ambiental, relieve, área de preservación permanente (APP) y las actividades de uso y ocupación del terreno. Se constató que principalmente por la topografía accidentada y las características de los materiales del suelo, la mayor parte del área debe ser destinada a la conservación ambiental.

Palabras clave: Zonificación Geoambiental. Geotecnologías. Fragilidad Ambiental.

Resumo

A área de estudo envolve 5 bacias hidrográficas localizadas na região da Serra da Rapadura (Minas Gerais - Brasil), apresentando uma área de 48,6 km². Com enfoque sobre potencialidades relativas às atividades de mineração, turismo e conservação ambiental, este trabalho lança mão de geotecnologias para realizar o zoneamento de potenciais de uso

1. Engenheira Ambiental. Mestranda em Geotecnia pela EESC - USP.

✉ cerdeirambiental@gmail.com

2. Engenheiro Civil. Mestrando em Geotecnia pela EESC - USP.

3. Engenheiro Ambiental. Mestrando em Geotecnia pela EESC - USP.

e ocupação da área de estudo. Para compartimentação da área em regiões com diferentes potencialidades de uso, foram elaboradas as cartas intermediárias de fragilidade ambiental e de restrições ambientais. A carta de fragilidade ambiental considerou aspectos relativos ao relevo, à composição dos materiais terrestres e às atividades de uso e ocupação atual do terreno. A carta de restrições ambientais classificou a área em regiões vulneráveis à ocupação, com restrições legais e áreas sem restrições, considerando limites relativos à fragilidade ambiental, relevo, áreas de preservação permanente (APP) e às atividades de uso e ocupação do terreno. Verificou-se que, principalmente em função da expressiva energia de relevo e às características dos seus materiais terrestres, a maior parte da área deve ser destinada à conservação ambiental.

Palavras-chave: Zoneamento Ambiental. Geotecnologias. Fragilidade Ambiental.

Abstract

The study area covers five watersheds located in the "Serra da Rapadura" (Minas Gerais - Brazil), with an extension of 48.6 km². Focusing on the potential for mining, tourism and implementation of conservation units, this work applies geotechnologies for the generation of environmental zoning. To make the area zoning, two charts were generated: the Environmental Fragility and the Environmental Constraints. The Environmental Fragility Chart was elaborated considering aspects related to the relief, the soil composition and the current land use and occupation. The Environmental Constraints Chart classified the area in the following regions: vulnerable to human occupation, with legal constraints and with no constraints. To make this classification were considered the environmental fragility chart, relief, permanent preservation areas and land use and occupation. The results provided that the area should be mainly designated to the implementation of conservation units due to the relief and soil characteristics.

Key-words: Environmental Zoning. Geotechnologies. Environmental Fragility.

INTRODUÇÃO

Dentre os vários recortes espaciais possíveis para planejamento, o mais utilizado no âmbito das ciências naturais é a bacia hidrográfica, por ser considerada uma unidade de análise adequada para estudos ambientais, devido ao seu caráter sistêmico (Cunico, 2007).

O planejamento territorial de uma bacia hidrográfica, com base em princípios ambientais, é o melhor método para evitar a degradação de recursos hídricos, pois além dessa vantagem as medidas de controle do escoamento das águas superficiais, de proteção da vegetação, de ordenação da ocupação do solo e de controle da erosão também refletem na proteção dos recursos hídricos, tanto quantitativa, como qualitativamente (Mota, 1999).

Os sistemas ambientais, face às intervenções antrópicas, apresentam maior ou menor fragilidade em função de suas características intrínsecas. Qualquer alteração nos diferentes componentes da natureza (relevo, solo, vegetação, clima ou recursos hídricos) causa o comprometimento da funcionalidade do sistema, quebrando o seu estado de equilíbrio dinâmico. Estas variáveis tratadas de forma integrada possibilitam obter um diagnóstico das diferentes categorias hierárquicas da fragilidade dos ambientes naturais (Spörl e Ross, 2004).

Ainda segundo os autores supracitados, os estudos relativos às fragilidades dos ambientes são de extrema importância ao Planejamento Ambiental. A identificação das fragilidades dos ambientes naturais proporcionam uma melhor definição das diretrizes e ações a serem implementadas no espaço físico-territorial, servindo de base para o zoneamento e fornecendo subsídios à gestão do território.

O zoneamento ambiental é um instrumento de grande auxílio no planejamento e gestão ambiental, constituindo-se

em um produto síntese onde se encontram individualizadas unidades que mostram graus de homogeneidade em função de semelhanças entre os atributos relativos aos elementos que integram. Essas unidades mostram, mesmo que de um modo implícito, as suscetibilidades e aptidões do terreno (Silva, 2002).

A utilização de geotecnologias permite uma melhor interpretação e representação dos fenômenos que atingem o espaço geográfico, contribuindo para a organização da área através do zoneamento ambiental (Silva e Silva, 2009).

O estudo das interações da declividade, solos e uso da terra na bacia hidrográfica assistido pelas geotecnologias, possibilita o armazenamento e gerenciamento desses dados, com rapidez e precisão, além de permitir a identificação de áreas propensas à degradação ambiental e a avaliação das estratégias de manejo antes que sejam adotadas (Câmara e Davis, 2002).

Nesse contexto, o trabalho ora apresentado propôs a utilização de geotecnologias para obtenção da Carta de Zoneamento Ambiental, baseada nas Cartas de Fragilidade Ambiental e Restrições Ambientais, com o intuito de indicar as áreas mais aptas a atividades de mineração, turismo e implantação de unidades de conservação.

METODOLOGIA

Localização da área de estudo

A área de estudo corresponde a cinco microbacias hidrográficas localizadas entre as seguintes coordenadas UTM aproximadas: 390598m/7695084m e 4202844m/7685882m, na Zona 23 Sul (Datum horizontal de referência: South American 1969). As bacias estão inseridas na região do entorno do Lago de Furnas, na divisa dos municípios de Carmo do Rio Claro e Guapé, mais especificamente na Serra da Rapadura, ao

Sul do Estado de Minas Gerais, no Brasil, conforme pode ser observado no mapa de localização da área de estudo (Figura 1).

A região de estudo compreende uma área total de 48,631 km². Buscando facilitar as caracterizações do presente diagnóstico, as bacias receberam as seguintes denominações: B01, B02, B03, B04 e B05. As bacias B01, B02 e B05 são contribuintes, respectivamente, dos Córregos da Água Limpa, dos Marques e Bonito. Conforme apresentado na Figura 1, a maior bacia é a B01, correspondendo a 36% da área total, e a menor é a B03, que representa 8% da área total da região de estudo.

DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS BÁSICOS E INTERMEDIÁRIOS

O documento base utilizado para delimitação das bacias hidrográficas, extração de informações relativas à rede de drenagem, curvas de nível e pontos cotados, foram as cartas topográficas do IBGE, na escala 1:50.000, referentes às folhas de Carmo do Rio Claro (IBGE, 1970a) e Guapé (IBGE, 1970b).

Inicialmente as cartas topográficas foram inseridas no AutoCAD Map e lá foram georreferenciadas, em seguida foram digitalizadas com o auxílio da ferramenta *polyline*. A rede de drenagem foi digitalizada da cabeceira para a foz e, em seguida foi hierarquizada de acordo com a classificação de Strahler (1952). A cada curva de nível, após a digitalização, foi atribuída a sua elevação, bem como foi realizado para os pontos cotados.

Os dados digitalizados no CAD (delimitação das bacias hidrográficas, rede de drenagem, curvas de nível e pontos cotados), foram importados para o ArcGIS em formato *.dwg* e convertidos para a extensão *.shp*, a qual possibilita processar e editar os arquivos nesse software.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) foi gerado a partir da interpolação das informações relativas ao contorno e elevação

(*countour*), curvas de nível, à elevação de pontos cotados (*point elevation*) e à direção do fluxo da rede de drenagem (*stream*), utilizando a ferramenta de interpolação específica para a finalidade em questão *Topo to Raster* (Hutchinson 1988, 1989) presente na extensão *3D Analyst*. O tamanho do pixel de saída utilizado foi de 5 metros.

Para validação qualitativa do MDE foram produzidas curvas de nível a partir do MDE interpolado e, posteriormente, estas foram comparadas visualmente com as curvas de nível originais vetorizadas das cartas topográficas, conforme procedimento preconizado pelo manual do ArcGIS (ESRI, 2007). Para geração das curvas de nível a partir do MDE, utilizou-se o comando *Countour*, presente na extensão *3D Analyst*. Como intervalo de elevação entre as curvas a serem geradas, foi adotada a metade do intervalo original das curvas de nível, 10 metros.

Para elaboração da Carta de Declividade utilizou-se o comando *Slope*, presente na extensão *3D Analyst*. Como imagem matricial de entrada foi utilizado o MDE supracitado.

Os aspectos geológicos da área em estudo foram obtidos através de levantamento bibliográfico e de levantamento de campo. Para identificação das unidades geológicas presentes na área, foram utilizadas as Notas Explicativas das Folhas de Alpinópolis e Guapé, produzidas pelo Serviço Geológico do Brasil em parceria com a Universidade Estadual do Rio de Janeiro (CPRM, 2007). Tais documentos são fonte de informações relevantes quanto às formações geológicas encontradas na região estudada.

O levantamento de campo permitiu a identificação visual das unidades geológicas e além disso, possibilitou o confronto e confirmação com os dados levantados na bibliografia. De forma resumida, o fluxograma a seguir (Figura 2) apresenta o processo de obtenção dos dados geológicos.

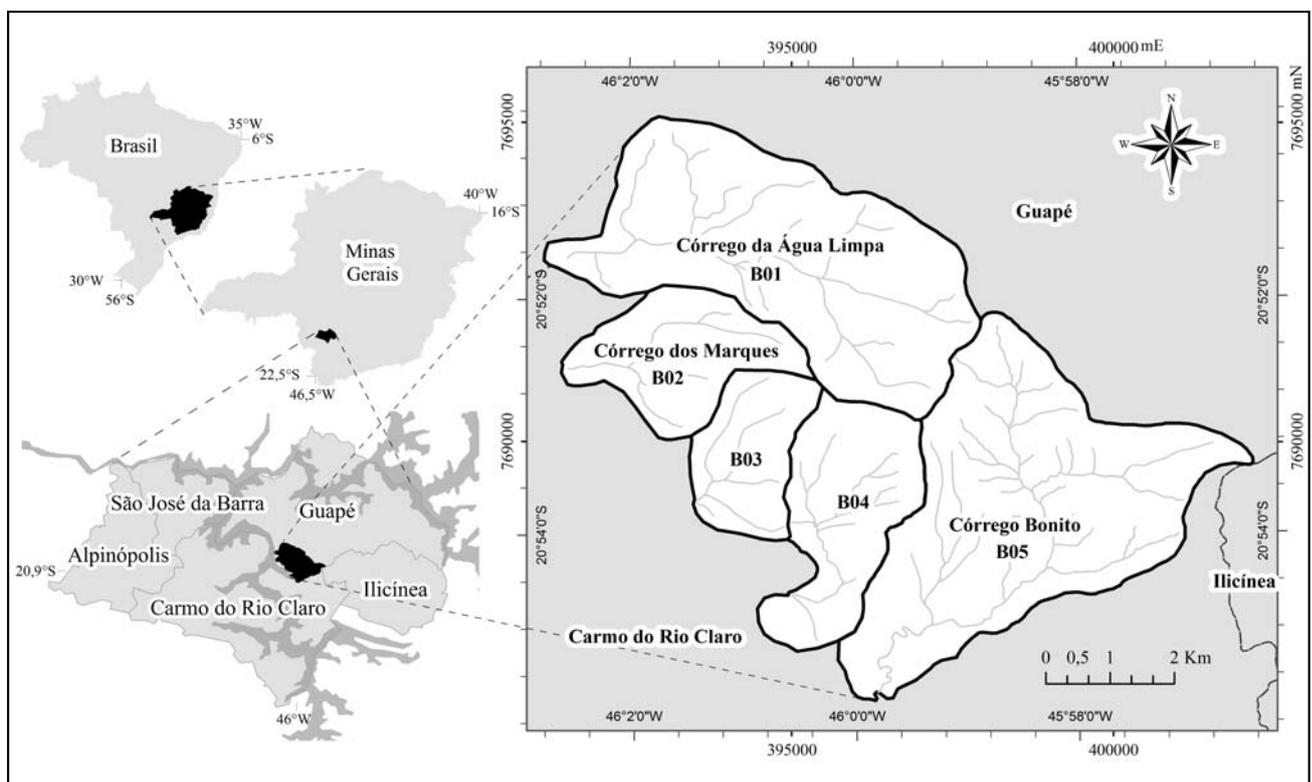


Figura 1. Localização da área de estudo.

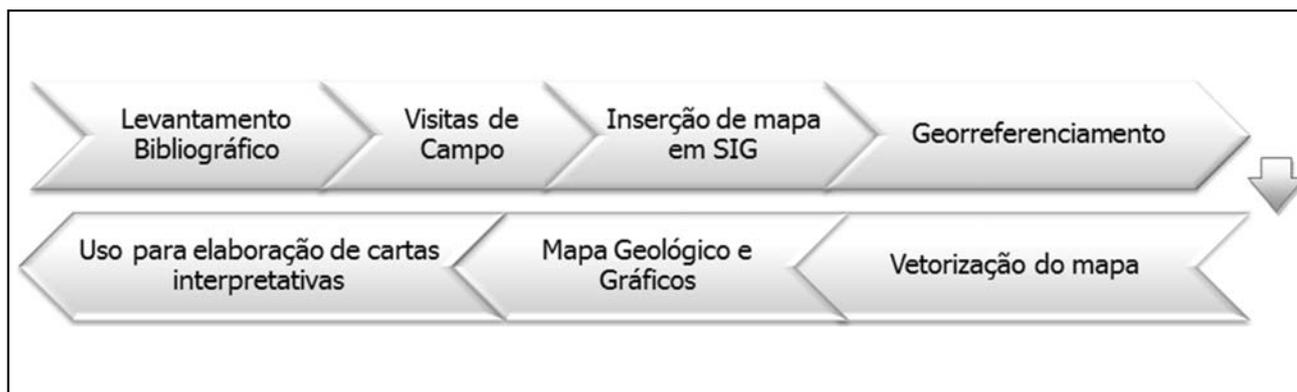


Figura 2. Fluxograma do processo de obtenção das informações de geologia.

Para obtenção do referido Mapa Geológico da Serra da Rapadura, as folhas dos mapas geológicos de Alpinópolis e Guapé foram inseridas no ArcGIS, e em seguida procedeu-se com o georreferenciamento das mesmas, a partir da sua grade de coordenadas UTM. Por fim procedeu-se a vetorização das unidades geológicas que compõem a área de estudo.

Vale destacar que a identificação e o correto posicionamento das referidas unidades é indispensável. Uma análise adequada, nesse aspecto, permite situar os locais mais propensos à instalação de pontos de extração mineral e avaliar seus potenciais de impacto ambiental sobre o meio. Ou seja, possibilita explorar o potencial econômico da região, inferindo de forma minimizada no meio ambiente.

Semelhantemente à geologia, o estudo dos solos da região se deu através de levantamento bibliográfico e visitas de campo. Na questão de bibliografia referente ao tema, foi utilizado o Mapa de Solos de Minas Gerais na escala 1:250.000,

elaborado pela *EMBRAPA (2005)*, que classifica as unidades pedológicas da área de estudo.

O mapa referido foi inserido no sistema de informações geográficas ArcGIS, e georreferenciado. Em seguida, o mesmo passou por um processo de vetorização para criação de polígonos que delimitam os diferentes tipos de solos. Assim, se obteve o Mapa Pedológico da área de estudo, o qual foi utilizado em cruzamento com outros atributos do meio físico para elaboração de cartas interpretativas.

Para a elaboração de um mapa de uso e ocupação, existem tanto técnicas analógicas, quanto digitais. Quando a região de estudo abrange uma área expressiva, a melhor opção é utilizar técnicas automáticas de classificação de imagens de satélite que permitem em curto espaço de tempo a obtenção de informações a respeito de registros de uso da terra.

A Figura 3 representa as principais atividades desenvolvidas no trabalho as quais envolveram rotinas de escritório e campo.

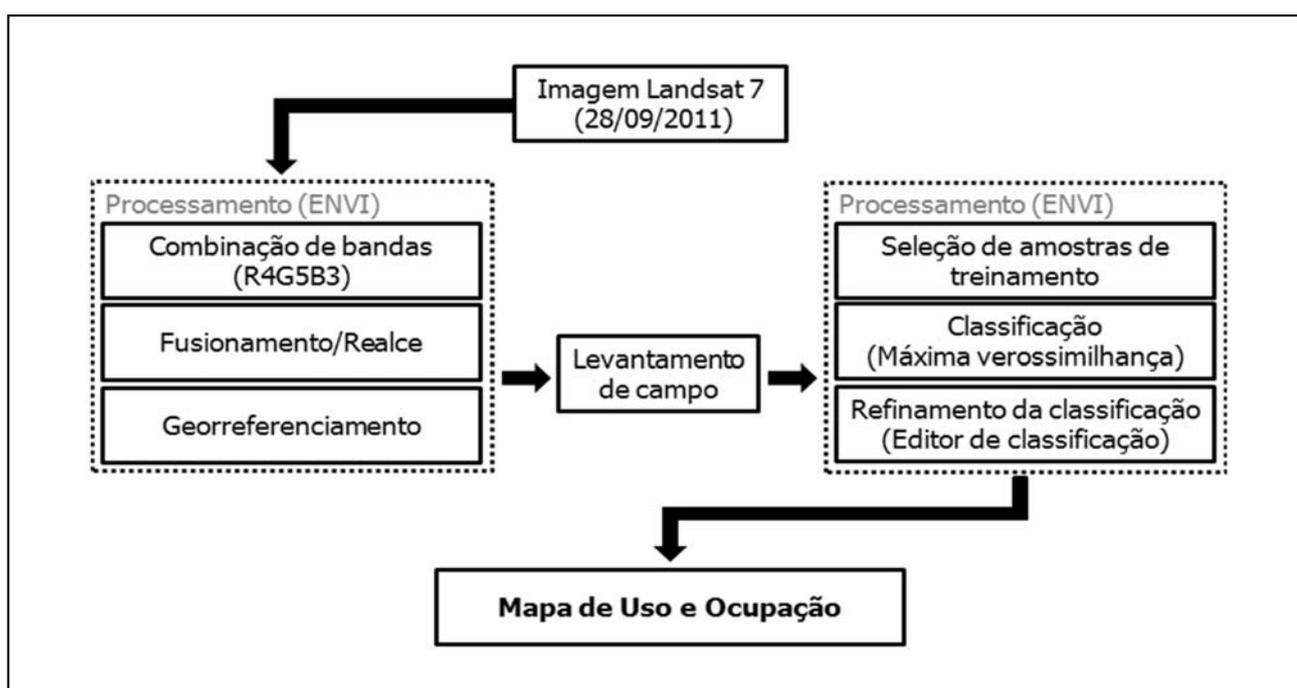


Figura 3. Fluxograma de aspectos metodológicos relacionados à produção do Mapa de Uso e Ocupação.

Neste estudo foi utilizada uma imagem do satélite Landsat 7, datada de 28 de Setembro de 2011 e o software Envi 4.8. As bandas multiespectrais (30 x 30 m) foram combinadas numa composição R4G5B3 e, em seguida, foi processada a fusão automática dessa composição colorida de baixa resolução espacial com a banda pancromática em tons de cinza de maior resolução (15 x 15 m). A fusão em questão foi processada por IHS e lançou mão do método de reamostragem "Nearest Neighbor", onde a imagem colorida é convertida para um sistema HLS e a componente L é substituída pela imagem de alta resolução e a nova imagem é revertida ao sistema RGB em uma composição colorida realçada.

Para a correção geométrica, ou georreferenciamento, realizada no Envi 4.8, os pontos de controle foram selecionados pelo modo de retificação "imagem para mapa" o qual consiste em registrar uma imagem a partir de um mapa conhecido, nesse caso as cartas topográficas do IBGE supracitadas. O sistema de projeção utilizado foi o UTM, o Datum Horizontal de Referência foi o *South American 1969*, no fuso 23 Sul. Vale ressaltar que esse procedimento é decisivo para a qualidade da correção geométrica, assim, dentre os quinze pontos de controle inicialmente selecionados, foram utilizados apenas dez pontos para obtenção do menor erro médio quadrático (RMS) possível, nesse caso, 0,385.

O levantamento de campo foi realizado com objetivo de caracterizar as principais classes de uso e ocupação da região de estudo, validar as amostras de treinamento e realizar um registro topográfico dessas. Nesta etapa, foi utilizado um GPS, uma máquina fotográfica digital e imagem Landsat 7 impressa. Em escritório, as amostras de treinamento foram acopladas ao *geodatabase* e utilizadas na escolha das "ROIS" (regiões de interesse) para a classificação supervisionada e validação da classificação.

Para a classificação da imagem foi utilizado um método supervisionado que se baseia no uso de algoritmos para se determinar os pixels que representam valores de reflexão característicos para uma determinada classe, o que justifica a seleção das regiões de interesse que representam as classes de uso e ocupação citada acima.

Vale destacar que o método de classificação aplicado foi o da máxima verossimilhança (*Maxver*) que atualmente é o método mais aplicado para o tratamento de imagens de satélite. Os métodos do paralelepípedo, da distância mínima da média e da rede neural também foram testados, contudo os resultados foram menos satisfatórios.

Para o refinamento da classificação foi utilizada a função de aglutinação de classes *Clump* e o refinamento manual no editor de classificação.

Concluída a fase de refinamento da classificação, foi realizada a vetorização dos *layers*, lançando mão de uma função que cria polígonos de vetor (extensão *.evf*) em áreas classificadas. Em seguida os vetores de extensão *.evf* foram convertidos para extensão *.shp* e exportados para o software ArcGIS onde as classes foram quantificadas e utilizadas no cruzamento com outros planos de informação para produção de cartas interpretativas apresentadas nesse trabalho.

DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS SECUNDÁRIOS

Carta de Fragilidade Ambiental

Para geração da Carta de Fragilidade Ambiental foram utilizados os seguintes produtos cartográficos: carta de declividade,

mapa de solos e o mapa de uso e ocupação. Para realizar a sobreposição desses planos de informação adaptou-se a metodologia proposta por Ross (1994), denominada Modelo de Fragilidade Potencial Natural com apoio nas Classes de Declividade.

Segundo a metodologia, os três planos de informação são hierarquizados em classes, que variam de 1 a 5, representando classes de fragilidade muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, respectivamente. Os intervalos de classes propostos são mostrados nas Tabelas 1, 2 e 3, a seguir.

Tabela 1. Classes de Fragilidade das Declividades (Ross, 1994).

Fragilidade	Categorias Hierárquicas	Código
Muito Baixa	até 6%	1
Baixa	de 6 a 12%	2
Média	de 12 a 20%	3
Alta	de 20 a 30%	4
Muito Alta	acima de 30%	5

Tabela 2. Classes de Fragilidade das Declividades (Ross, 1994).

Fragilidade	Categorias Hierárquicas	Código
Muito Baixa	Sem ocorrência	1
Baixa	Sem ocorrência	2
Média	Sem ocorrência	3
Alta	Cambissolo Háplico	4
Muito Alta	Neossolo Litólico	5

Tabela 3. Classes de proteção de Uso e Ocupação (Ross, 1994).

Proteção	Categorias Hierárquicas	Código
Muito Baixa	Área Degradada	5
Baixa	Pastagem / Agricultura	4
Média	Sem ocorrência	3
Alta	Campo / Cerrado	2
Muito Alta	Matas naturais	1

A carta de Declividade foi reclassificada, de acordo com os códigos da Tabela 1, utilizando-se a ferramenta *Reclassify*. O mapa de solos foi primeiramente rasterizado, utilizando-se o comando *Polygon to Raster* e, em seguida, reclassificado de acordo com a Tabela 2, com auxílio da ferramenta *Reclassify*.

Já os temas de uso e ocupação no formato vetorial foram unidos em um tema único, com a ferramenta *Union*, este resultado foi então transformado para o formato matricial com o comando *Polygon to Raster* e, finalmente reclassificado de acordo com a Tabela 3, utilizando-se a ferramenta *Reclassify*.

A sobreposição dos temas foi realizada considerando que a declividade exercia uma influência para a Fragilidade Ambiental de 50%, solo, e uso e ocupação, 25%. Para realizar este cálculo foi utilizado o comando *Raster Calculator* e inserida a seguinte expressão (Equação 1):

$$\text{Fragilidade} = \frac{(2 * \text{Declividade}) + (\text{Solos}) + (\text{Uso e Ocupação})}{4} \quad \text{Equação (1)}$$

Nesta expressão são utilizadas as matrizes geradas para realização de uma média ponderada entre os valores de Fragilidade Ambiental dos pixels sobrepostos de cada tema. A matriz resultante deste cálculo é a que contém as classes de Fragilidade Ambiental da área.

Carta de Restrições Ambientais

Para geração da Carta de Restrições Ambientais foi utilizada a Carta de Fragilidade Ambiental, a Carta de Declividades, o Mapa de Uso e Ocupação e as APPs. Foram definidas três classes para este mapa: Restrições Legais, Áreas Vulneráveis à Ocupação, e Sem Restrições.

As APPs foram delimitadas utilizando a ferramenta *Buffer*, para as drenagens gerou-se o *buffer* de 30 m, para nascentes, de 50 m e para a represa, de 100 m. Foram utilizadas também, do Mapa de Uso e Ocupação, as áreas de Mata no formato vetorial.

Da Carta de Declividades foram extraídas e vetorizadas as classes de 30 a 45% e acima de 45%. Para isso foi selecionada a classe de interesse na Tabela de Atributos do tema e utilizada a ferramenta *Raster to Polygon*. Dessa forma, foram gerados separadamente dois arquivos vetoriais, um contendo somente as classes de declividade de 30 a 45% e outro contendo as classes acima de 45%. Foi utilizado procedimento análogo para extrair e vetorizar as classes 4 e 5 do Mapa de Fragilidade Ambiental.

A classe de Restrições Legais foi elaborada agrupando-se os vetores de declividade acima de 45%, APPs, Mata e classe de Fragilidade Ambiental igual a 5. Estes vetores foram agrupados com o comando *Union* e em seguida rasterizados com a ferramenta *Polygon to raster*.

A classe de Áreas Vulneráveis à Ocupação foi elaborada agrupando-se, por meio do comando *Union*, os vetores de declividade entre 30 e 45% e classe de Fragilidade Ambiental igual a 4. O resultado foi transformado para o formato matricial, com a ferramenta *Polygon to raster*. A classe Sem Restrições foi toda aquela que não se enquadrava nas outras duas classes descritas.

Zoneamento Ambiental

O Zoneamento Ambiental foi realizado a partir da Carta de Restrições Ambientais, dos Mapas de Geologia e de Uso e Ocupação e também a partir de visitas a campo. O zoneamento foi feito quanto ao potencial da área para fins de atividades de mineração, turismo e implantação de unidades de conservação.

A delimitação das áreas mais indicadas para mineração foi feita pela sobreposição dos planos de informação de Geologia e Restrições Ambientais. Foram selecionadas e digitalizadas, no próprio software ArcGIS, as áreas de intersecção de quartzito e classe sem restrições ambientais.

A delimitação das áreas mais indicadas para implantação de unidades de conservação foi feita sobrepondo-se os temas de Restrições Ambientais e Uso e Ocupação. Procurou-se selecionar as intersecções de áreas com maior segmento contínuo de mata e áreas com restrição ambiental (legal ou vulnerável à ocupação). As áreas assim definidas foram então digitalizadas.

As áreas com maior potencial para turismo foram definidas basicamente em função do Mapa de Uso e Ocupação e das visitas a campo. Foram delimitadas e digitalizadas as áreas próximas à represa ou com agricultura e com presença de

elementos de interesse turístico, como cachoeiras e afloramentos rochosos.

RESULTADOS

Documentos Cartográficos Básicos e Intermediários

O padrão de drenagem predominante na bacia corresponde ao dendrítico, que possui configuração arborescente, onde o eixo principal corresponde ao tronco da árvore. Os ramos formados pelos tributários distribuem-se em todas as direções na superfície do terreno e se unem formando ângulos agudos de gradações variadas.

A Tabela 4 apresenta a quantificação dos canais de primeira ordem, bem como a área de cada uma das cinco bacias hidrográficas.

Tabela 4. Características morfométricas das bacias hidrográficas.

Bacias	Área (km ²)	Nº de canais de 1ª ordem
B01	16,03	16
B02	5,08	4
B03	3,76	5
B04	6,22	10
B05	17,54	27
Total	48,63	62

A variação altimétrica da área de estudo, representada pela hipsometria (Figura 4) engloba valores entre 702 e 1.315 metros de altitude.

A Figura 5 apresenta a Carta de Declividades das bacias hidrográficas com seis classes de declividade sobreposta à delimitação das bacias hidrográficas.

Observa-se que a classe de declividade de 12 a 20% ocupa uma superfície de 12,82 km², o que corresponde a 26,36%, sendo a mais abrangente na área de estudo, seguida pelas classes de 20 a 30%, e maior que 30%. Em contrapartida, a classe menos ocorrente é a de 0 a 6%, ocupando uma superfície de 6,33 km², o que corresponde a 13,01% da área de estudo, como pode ser observado na Tabela 5 e Figura 6, que apresentam dados quantitativos.

Com a inserção no software de SIG, e a vetorização do Mapa de Geológico, foi possível analisar a distribuição das unidades geológicas. Fazendo estudo do relatório do CPRM (2007), constata-se a existência de duas unidades geológicas: Quartzito Furnas (código NP2axqz2) e Muscovita-xisto (código NP2axmx).

A unidade de Quartzito Furnas - NP2axqz2 é a que apresenta os maiores relevos da região, com cristas e chapadas. Corresponde a um pacote de quartzitos que variam em espessura de 30 a 100 metros. No interior deste pacote existem intercalações de muscovita-xisto e muscovita-quarto xisto que têm espessuras variando entre centímetros e metros. A unidade Muscovita-xisto - NP2axmx apresenta intercalações, que variam de centímetros a metros, de quartzito micáceo (NP2axqz3) (CPRM, 2007).

A quantificação das áreas permitiu comparar as distribuições das unidades geológicas. Observa-se a predominância da unidade de quartzito, o que potencializa a região para fins de exploração mineral, sendo que esta unidade representa 67,66% da área total estudada.

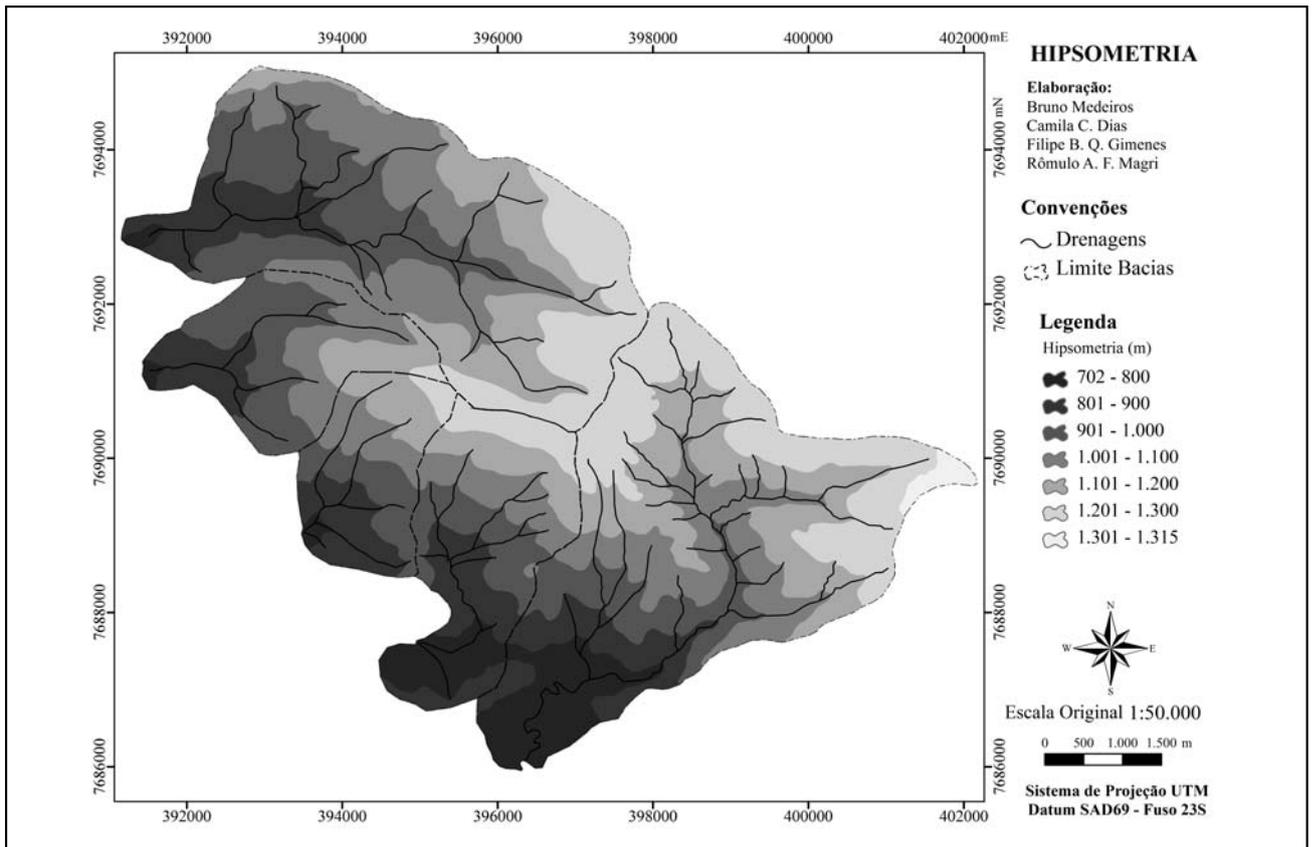


Figura 4. Carta Hipsométrica da região da Serra da Rapadura.

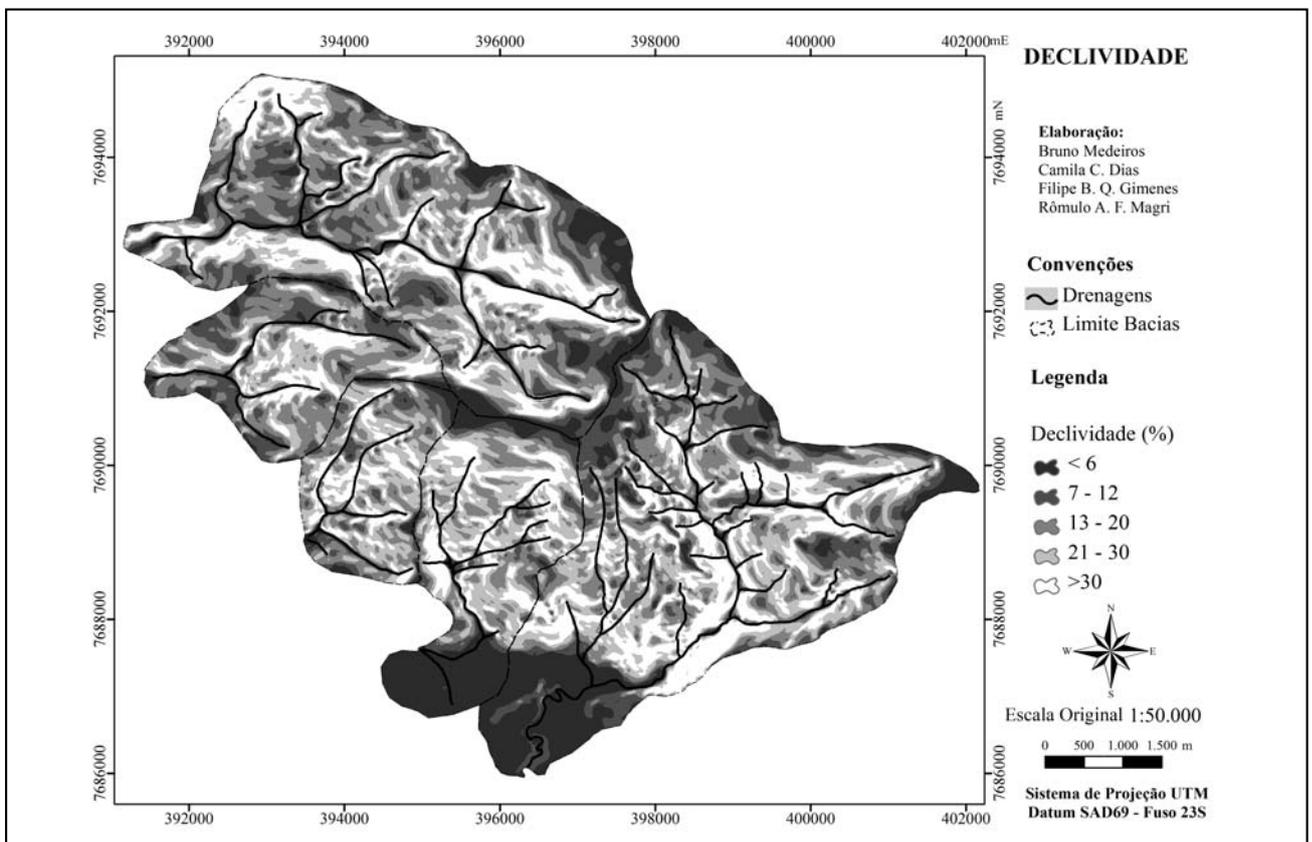


Figura 5. Carta de Declividade da Serra da Rapadura.

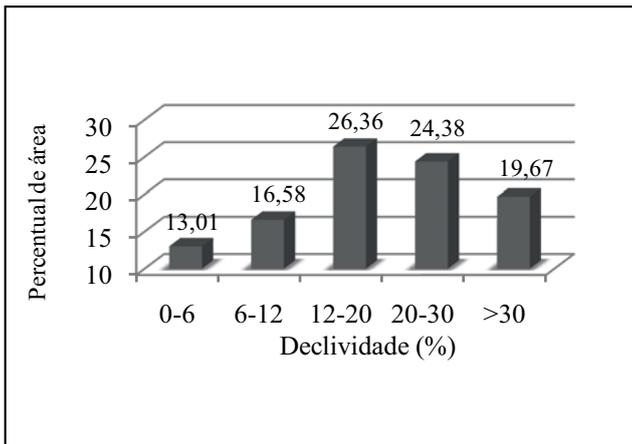


Figura 6. Percentual ocupado por classe de declividade.

Tabela 5. Áreas das classes de declividade.

Classes	Nº Pixels	(%)	Área (km ²)
0-6	252744	13,01	6,33
6-12	322178	16,58	8,06
12-20	512236	26,36	12,82
20-30	473604	24,38	11,85
>30	382203	19,67	9,57
Total	1942965	100,00	48,63

O mapa de solos da região de estudo permitiu a identificação espacial das características pedológicas da área. Visitas em campo mostraram que os solos ocorrentes apresentam pouca espessura (em torno de 10 cm), por vezes ocorrendo sobre rocha sã, e outras raras sobre materiais de alteração de rocha quartzítica. Este horizonte de solo constitui-se de pedras e seixos, e pela sua gênese e as características da rocha-mãe, se apresenta bastante pobre em nutrientes.

Devido às características de alta declividade, quase inexistência dos solos e pobreza de nutrientes, a região não é considerada adequada para a atividade agrícola ou pecuária extensivas, restringindo-se a pequenas áreas utilizadas por pequenos produtores em regiões mais planas, próximas às margens do reservatório.

Há dois tipos de solos na área considerada: Neossolo Litólico Distrófico (RLd30) e Cambissolo Háptico Distrófico (CXd101). Em outras regiões de cerrado do país, estes tipos de solos se apresentam bastante férteis, porém nesta área são distróficos e por vezes muito ácidos. Estas características se refletem visualmente na região, pela ausência de vegetação de grande porte, predominando arbustos e gramíneas, e pequenas árvores em torno dos canais de drenagem.

Foram identificadas as seguintes classes de uso e ocupação: campo, mata, solo exposto, pastagem, agricultura e represa. O Mapa de Uso e Ocupação e o Gráfico de percentual de área ocupado por cada classe de uso e ocupação atual da região e a Tabela de quantificação de áreas estão apresentados respectivamente nas Figuras 7 e 8 e na Tabela 6.

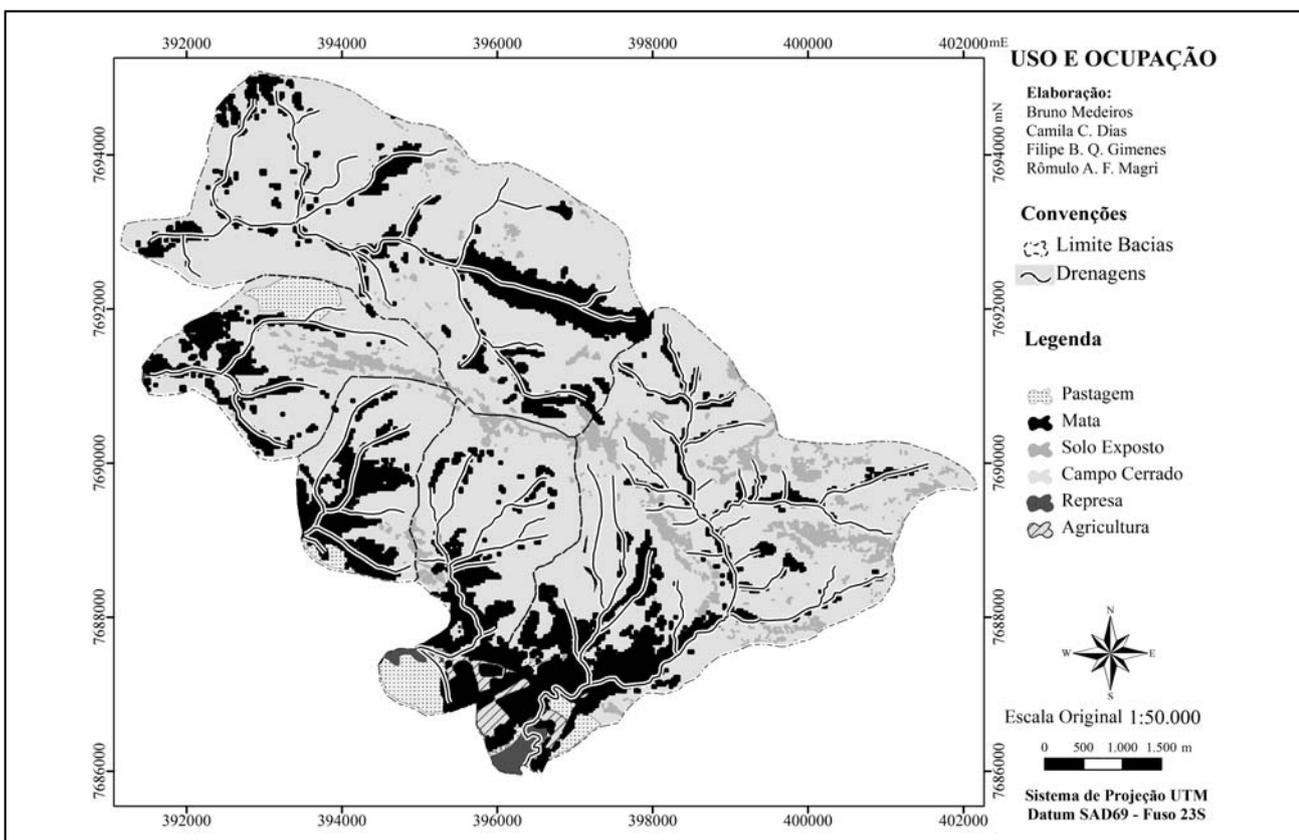


Figura 7. Mapa de Uso e Ocupação da região da Serra da Rapadura.

Tabela 6. Áreas das classes de Uso e Ocupação.

Classes	Nº Pixels	(%)	Área (km ²)
Represa	13745	0,71	0,34
Mata	465944	24,05	11,69
Campo	1281914	66,15	32,17
Pastagem	53412	2,76	1,34
Agricultura	15261	0,79	0,38
Área Degradada	107502	5,55	2,70
Total	1937778	100,00	48,63

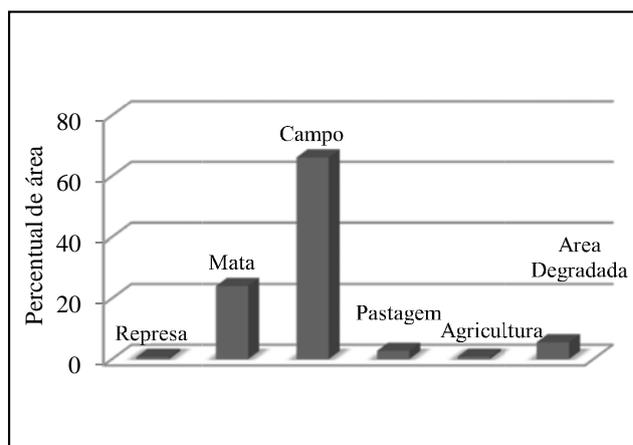


Figura 8. Percentual ocupado por classe de Uso e Ocupação.

A área estudada está situada nos municípios de Carmo do Rio Claro e Guapé, a qual está inserida numa região de transição entre os biomas denominados cerrado e floresta atlântica.

As formações campestres presentes representam a maior parte da área de estudo abrangendo uma área de 32,17 km² (66%), e são representadas pelas fitofisionomias: campo limpo, campo sujo, campo rupestre e campo cerrado. O campo limpo é uma formação vegetal caracterizada por campos revestidos maciçamente por gramíneas, apresentando, às vezes, arvoretas muito afastadas entre si. Ocorre em solos arenosos rasos ou duros, nos quais há real deficiência de água durante os meses mais secos (Rizzini, 1979). O campo sujo exibe gramíneas e presença de arbustos. O campo rupestre apresenta um estrato herbáceo quase contínuo, poucos subarbustos e arbustos espalhados pelos campos. O campo cerrado caracteriza-se por pequenas árvores e inúmeros arbustos que crescem sobre uma cobertura de ervas e capins (Menezes e Giuliatti, 2000).

As matas representam aproximadamente 24% da área de estudo e estão presentes principalmente nas margens dos cursos d'água. Nessa classe, estão incluídas as fitofisionomias floresta estacional semidecidual e cerrado típico. As mesmas exercem a função de proteção de mananciais aquáticos e do terreno às margens desses. Sem elas, esses terrenos seriam levados pelo escoamento superficial, em processo acelerado de erosão. Além disso, funcionam como refúgios úmidos que garantem a sustentação da maior parte das espécies da fauna existente na região, principalmente no período seco do ano.

A floresta estacional semidecidual (ou mata seca) está relacionada diretamente a fatores climáticos, com a existência de duas estações climáticas (seca e chuvosa). Muitas espécies da floresta estacional semidecidual recebem influência do cerrado nas regiões onde as florestas ocorrem nos interflúvios com o cerrado (Silva, 2002). O cerrado típico está presente apenas na cabeceira da bacia do Córrego da Água Limpa (B1), esse compreende uma cobertura vegetal composta de árvores isoladas, baixas, tortuosas, geralmente de casca grossa, folhas grandes, coriáceas e raízes profundas. O estrato arbustivo apresenta alturas bem variadas, seu estrato subarbustivo-herbáceo, geralmente desaparece no período de seca e reaparece no início das chuvas.

A classe solo exposto ocupa cerca de 5,6% da área e envolve áreas de mineração de quartzito, focos erosivos de extensão variada e cicatrizes deixadas por cavas abertas de exploração de quartzito e áreas de pesquisa mineral. Deve-se ter uma atenção especial sobre o impacto ambiental gerado pela classe em questão, grande modificadora da paisagem, nas bacias do Córrego dos Marques (B02) e do Córrego Bonito (B05), onde se encontram uma mineração ativa e uma inativa, respectivamente. Na bacia B04, durante o levantamento de campo, foram inventariados dois focos erosivos expressivos.

As classes de pastagem e agricultura são menos expressivas ocupando respectivamente 1,34 km² e 0,38 km², o que é justificado pela sua inviabilidade econômica devida à baixa aptidão agrícola. As características do meio físico que justificam essa afirmação são: solos de baixa fertilidade, solos inexistentes e topografia acidentada.

A classe represa consiste em áreas inundadas pelo reservatório da usina hidrelétrica de Furnas que possui uma cota variável com a sazonalidade.

Documentos Cartográficos Secundários

Fragilidade

A Carta de Fragilidade gerada pode ser visualizada na Figura 9. Para facilitar sua interpretação, o número de pixels ocupados em cada classe foi obtido no software ArcGIS e a partir deste valor foram calculadas as respectivas áreas e seu percentual em relação à área total, como pode ser visto na Tabela 7 e na Figura 10.

Como pode ser observado, há um predomínio das classes Média e Baixa de Fragilidade, sendo que as duas somadas representam 76,88% do total. A classe com menor percentagem é a Muito Alta com 0,22 km² (0,45%) e a maior é a Média com 24,68 km² (51,11%).

O predomínio da classe Média pode ser justificado pelo fato de que a declividade, que tem influência de 50% para geração desta carta, apresenta como principal classe 12-20%, que representa classe 3 (média) de fragilidade.

É importante notar que no entorno das drenagens a fragilidade não foi considerada muito elevada, isto se justifica pelo fato da metodologia não considerar APPs como critério de classificação, pois considera apenas a vegetação existente, delimitada no Uso e Ocupação.

Restrições Ambientais

A Carta de Restrições Ambientais é mostrada na Figura 11. Adicionalmente, foi calculada a área de cada classe, bem como as percentagens, como pode ser visto na Tabela 8 e Figura 12.

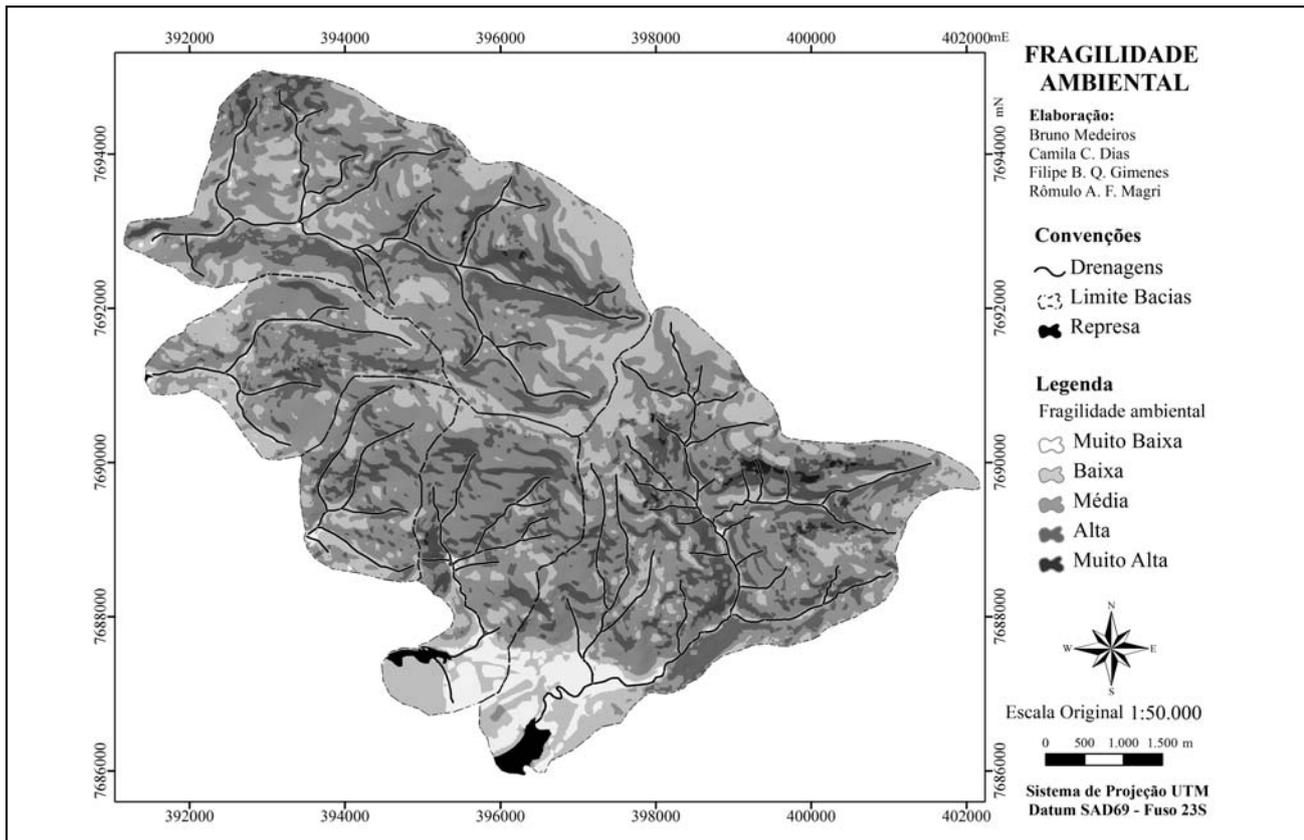


Figura 9. Carta de Fragilidade Ambiental da Serra da Rapadura.

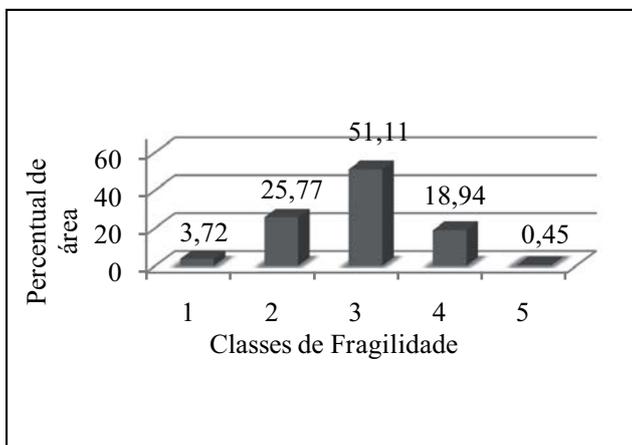


Figura 10. Percentual ocupado por classe de Fragilidade Ambiental.

Tabela 7. Áreas das classes de Fragilidade Ambiental.

Classes	Nº Pixels	(%)	Área (km ²)
1 Muito Baixa	71641	3,72	1,80
2 Baixa	495774	25,77	12,44
3 Média	983238	51,11	24,68
4 Alta	364319	18,94	9,14
5 Muito Alta	8726	0,45	0,22
Total	1923698	100,00	48,29

As áreas de Restrição Legal totalizaram 16,33 km² (33,58%), pois além de considerar as áreas de Fragilidade Muito Alta também foram consideradas as APPs. Isto foi feito para limitar o uso na elaboração do zoneamento ambiental, e evitar que áreas legalmente protegidas fossem indevidamente utilizadas.

As áreas Vulneráveis à Ocupação representam a menor parte do total, ocupando 5,81 km² (11,94%). São áreas menos sensíveis do que as legalmente restritas, mas que ainda assim devem ser preferencialmente protegidas, pois são áreas com Fragilidade Ambiental Alta e declividade entre 30 e 45%.

Tabela 8. Áreas das classes de Restrições Ambientais.

Classes	Nº Pixels	(%)	Área (km ²)
Restrição Legal (RL)	649627	33,58	16,33
Vulnerabilidade a Ocupação (VO)	231099	11,94	5,81
Sem restrições	872101	45,07	21,92
Sobreposição RL+VO	181987	9,41	4,57
Total	1934814	100,00	48,63

As áreas consideradas Sem Restrições ocuparam a maior parte da área com 21,92 km² (45,07%) e foram assim classificadas, pois apresentaram Fragilidade Ambiental de Média a Muito Baixa, representando ausência de matas naturais e declividades moderadas. Além disso, não engloba nenhuma área especialmente protegida. Estes resultados são muito importantes para a delimitação do Zoneamento Ambiental.

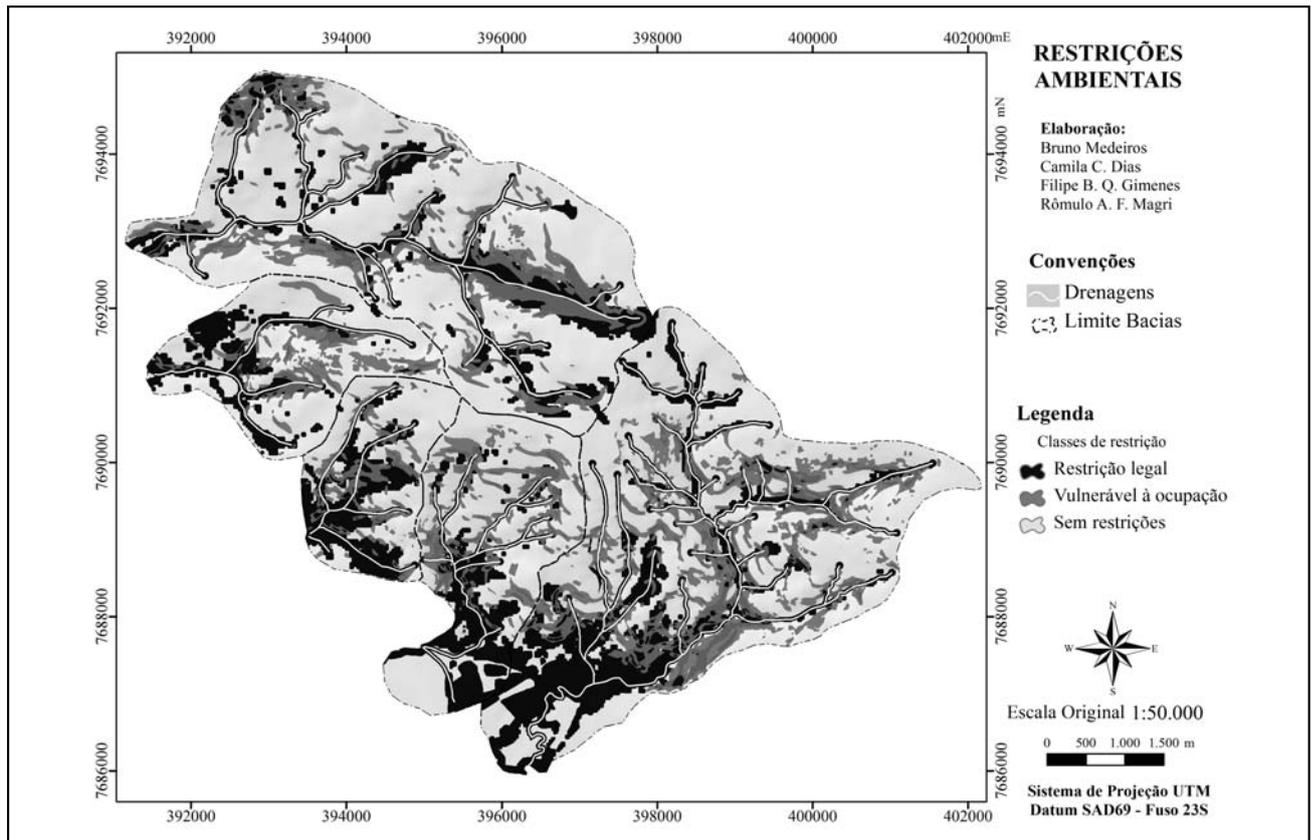


Figura 11. Carta de Restrições Ambientais.

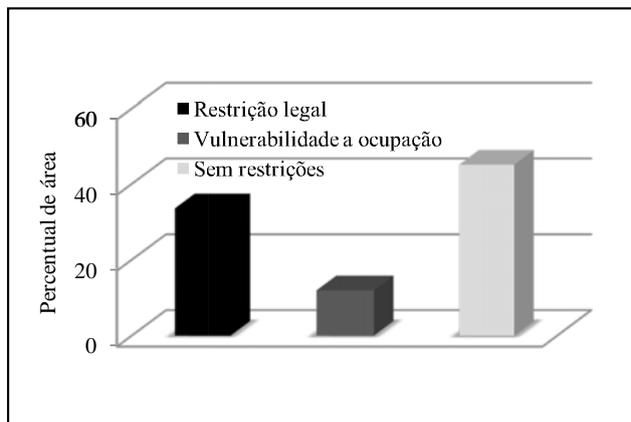


Figura 12. Percentual ocupado por classe de Restrições Ambientais.

Zoneamento Ambiental

O Zoneamento Ambiental elaborado é mostrado na Figura 13. Foram selecionadas duas áreas com maior potencial para atividade de mineração. Alguns pixels com restrição ambiental foram englobados, mas por serem muito reduzidos e estarem isolados não foram considerados representativos. Há um empreendimento de mineração que se encontra parcialmente dentro da área maior delimitada para mineração.

As áreas que apresentam maior potencial turístico ficam concentradas nas extremidades inferiores das bacias, pois nestas áreas se encontram a represa de Furnas além de algumas cachoeiras. Para esta delimitação, as visitas de campo foram de grande importância, pois possibilitaram a verificação de elementos de interesse turístico.

A maior parte da área de estudo acabou sendo delimitada com potencial para implantação de unidades de conservação. Tal fato se justificou pela presença de vários fragmentos de mata natural associadas a relevo acidentado, caracterizando áreas que apresentam restrições legais e são vulneráveis a ocupação.

CONCLUSÕES

A Carta de Fragilidade Ambiental permitiu a hierarquização em classes da área de estudo, que variaram de muito baixa a muito alta, e que subsidiaram a elaboração da Carta de Restrições ambientais e, indiretamente, o Zoneamento Ambiental da área.

A Carta de Restrições Ambientais possibilitou a delimitação de áreas de Restrição Legal incluindo APPs, que não foram consideradas na Carta de Fragilidade Ambiental. Dessa forma, a compartimentação da área de estudo em zonas pôde ser mais bem analisada quanto ao seu potencial de uso.

As ferramentas disponíveis nos diferentes software de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento possibilitaram uma integração dos planos de informação tornando as análises visuais, interpolações, cruzamentos, cálculos e interpretações mais rápidas. Além disso, os dados assim gerados ficam disponíveis para eventuais repetições.

O conjunto de geotecnologias utilizado mostrou-se eficiente para elaboração das Cartas de Fragilidade Ambiental e Restrições Ambientais que culminaram na compartimentação das Bacias Hidrográficas estudadas em zonas com diferentes potencialidades de uso do terreno, com enfoque para atividade minerárias, turísticas e implantação de unidades de conservação.

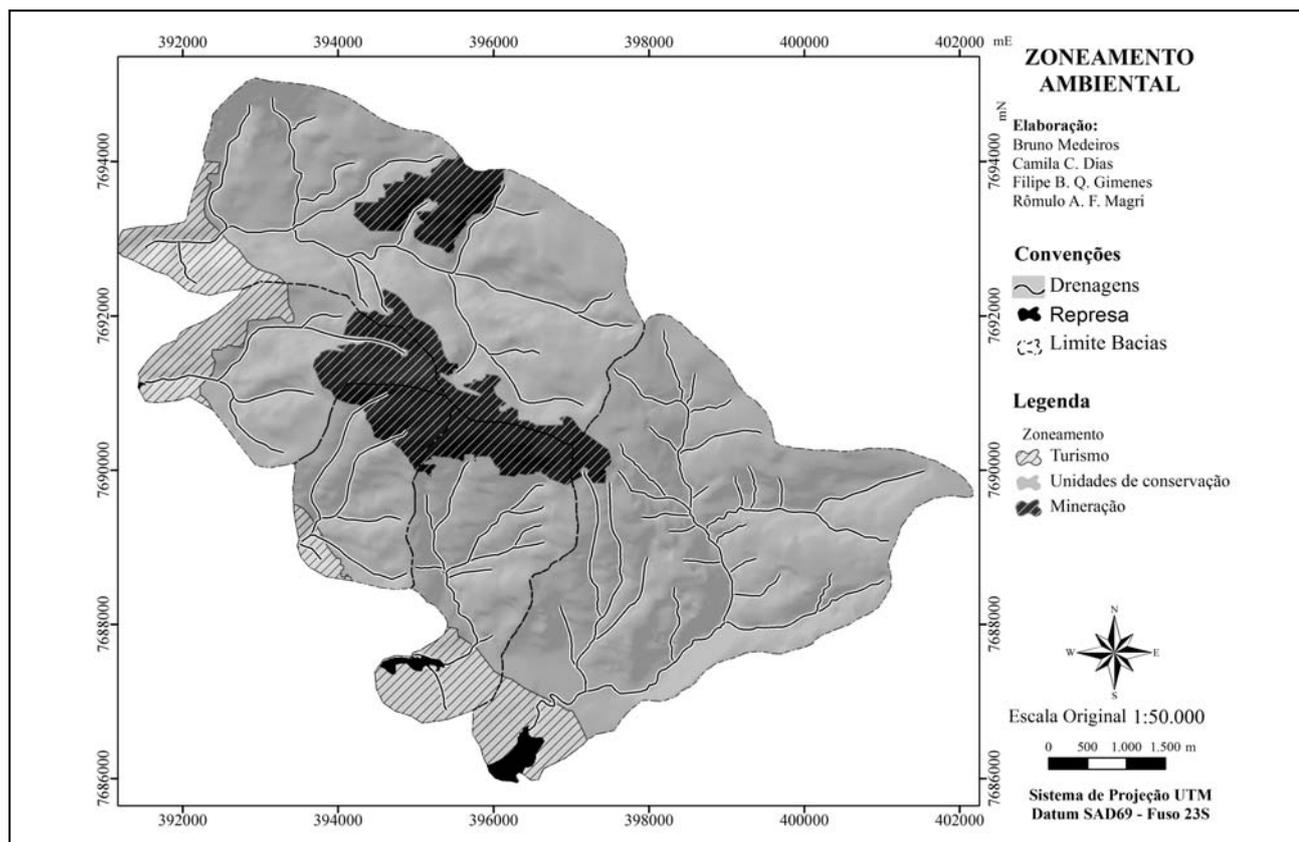


Figura 13. Zoneamento Ambiental da Serra da Rapadura.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

CÂMARA, G.; DAVIS, C, 2002.

Introdução à Ciência da Geoinformação.

Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilbertollivro/introd>>. Último acesso em: 26 de novembro de 2011.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL, 2007.

Geologia da Folha Alpinópolis SF.23-V-B-V. Nota Explicativa das Folhas: Alpinópolis (SF.23-V-B-V) e Guapé (SF.23-V-B-IV). Escala 1:100.000.

Programa Geologia do Brasil. Contrato CPRM-UERJ Nº. 057/PR/05. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. ISBN 978-85-7499-032-3.

CUNICO, C, 2007.

Zoneamento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Marumbi - PR: Perspectivas para a Análise e Avaliação das Condições Sócio-Ambientais.

Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2005.

Mapa de solos de Minas Gerais.

Escala 1:1.250.000.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE, 2007.

Arcgis10 Help: The geographic information system (GIS) for everyone. 400p.

HUTCHINSON, M. F, 1988.

Calculation of hydrologically sound digital elevation models.

Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Australia.

HUTCHINSON, M. F, 1989.

A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits.

Journal of Hydrology, 106: 211-232.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 1970A.

Carta Topográfica de Carmo do Rio Claro, MG - Escala 1:50.000.

Folha SF-23-V-B-IV-4.

- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 1970B.
Carta Topográfica de Guapé, MG – Escala 1:50.000. Folha SF-23-C-III-3.
- MENEZES, N. L.; GIULIETTI, A. M.
Campos rupestres.
In: MENDONÇA, M. P.; LINS, L. V. (orgs.), 2000. Lista vermelha das espécies ameaçadas de extinção da flora de Minas Gerais. Fundação Biodiversitas. Fundação Zoo-Botânica de Belo Horizonte. Belo Horizonte - MG. 160p.
- MOTA, S, 1999.
Urbanização e Meio Ambiente.
Rio de Janeiro: ABES.
- SILVA, J. M. O.; SILVA, E. V, 2009.
Cartografia Aplicada ao Planejamento Ambiental em Unidade de Conservação no Município de Beberibe. Ceará. *In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 13. [Anais...]. Viçosa.*
- SILVA, M. M, 2002.
Técnicas cartográficas aplicadas ao zoneamento ambiental: Município de Jacareí - SP.
Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro.
- SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S, 2004.
Análise Comparativa da Fragilidade Ambiental com Aplicação de Três Modelos.
In: GEOUSP - Espaço e Tempo, 15. São Paulo.
- STRAHLER, A. N, 1952.
Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography.
Geological Society America Bulletin, 63, p.1119-1142.
- RIZZINI, C. T, 1979.
Tratado de fitogeografia do Brasil.
Ed. USP. São Paulo.
- ROSS, J. L. S, 1994.
Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados.
Revista do Departamento de Geografia/FFLCH/USP. Nº 8. pp. 63-73.



Retroceso costero y su relación con parámetros geotécnicos. Las Grutas, Río Negro

Coastal receding and its relation to geotechnical parameters. Las Grutas, Río Negro

Kokot, Roberto R. ¹⁻²✉ - Salminci, José G. ¹⁻³ - Luna Fabio S. ³ - Tunstall, Cynthia ¹

Recibido: 06 de Julio de 2012 • Aceptado: 06 de Mayo de 2013

Resumen

Se estudia el sector costero del balneario Las Grutas donde afloran rocas sedimentarias y piroclásticas y el área de Piedras Coloradas con afloramiento de rocas graníticas. Los dos sectores están localizados en el Golfo San Matías sobre la costa del Océano Atlántico, al noreste de la Provincia de Río Negro. En Las Grutas, la costa está en retroceso y la acción antropogénica constituye un factor coadyuvante en el proceso erosivo en relación con la importante expansión urbana de la localidad, en tanto que la costa de Piedras Coloradas no muestra un retroceso aparente.

Se relacionan las tasas de erosión costeras, cuantificadas en trabajos previos, con las características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas de los afloramientos involucrados en los procesos erosivos. También se analizan los factores geológicos que controlan el retroceso costero y la inestabilidad del acantilado teniendo en cuenta los parámetros marinos que influyen en el desarrollo de procesos de erosión costera.

Se relevó el acantilado, registrando litología, altura, pendientes y estructuras, evaluando in situ la resistencia de los afloramientos de acuerdo al método ISRM y por medio de un Martillo de Schmidt calibrado para su uso en rocas. Se obtuvieron testigos a partir de muestras de campo y se desarrollaron los siguientes estudios: análisis petrográfico, contenido de humedad, absorción de agua, densidad específica, porosidad, velocidad de ondas sínicas, resistencia a la compresión simple seca y saturada.

Los resultados de los ensayos de laboratorio, comparados con los relevamientos, permitieron ampliar el conocimiento de la geología de la zona y determinar la correspondencia entre el modelo geológico-geomorfológico y los parámetros geotécnicos.

Los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos para los granitos corresponden a resistencias muy altas, para las tobos son bajos y para las areniscas muy bajos. Estos valores de resistencia a la compresión se relacionan directamente con el retroceso de la línea de costa.

1. Departamento Ciencias Geológicas, FCEyN (UBA)

2. IGEBAs- CONICET

✉ rkokot@gl.fcen.uba.ar

3. INTI- Construcciones – UT Geología Aplicada y Ambiental

Los valores obtenidos a partir del uso del esclerómetro presentan limitaciones. Respecto a las rocas con altos valores de resistencia a la compresión simple los resultados salen de escala y en las

rocas de baja resistencia dan valores mayores que los reales. Sin embargo existe una correspondencia cualitativa entre los valores de resistencia de las litologías estudiadas.

Palabras Clave: *Erosión. Costa de Río Negro. Geotecnia. Martillo de Schmidt.*

Abstract

The coastal area of Las Grutas where sedimentary and pyroclastic rocks outcrops, and the area of Piedras Coloradas with granite outcrops, are studied. The two sectors are located in the San Matías Gulf on the Atlantic Ocean, northeast of the Río Negro Province. In Las Grutas, the coast is receding and anthropogenic action is a contributing factor in the erosion process in relation to major urban expansion of the town, while the coast of Piedras Coloradas shows no apparent receding.

Erosion was previously quantified and this work relates it with the geological, geomorphological and geotechnical characteristics of the outcrops. It also discusses the geological factors that control coastal retreat and cliff instability taking into account the marine parameters influencing the development of coastal erosion processes.

Surveys were conducted at the cliff, recording lithology, altitude, slope, structures and site assessments of the strength of the outcrops by a Schmidt Hammer calibrated for rocks. Also, the rock strength was evaluated following ISRM Methods. Rock core samples were obtained from field samples; the following studies were performed: petrographic analysis, moisture content, water absorption, specific gravity, porosity, sonic wave velocity, compressive strength dry and saturated.

The results of laboratory tests compared well with the surveys, provided an expanded knowledge of the geology of the area and allowed for the correlation between the geological-geomorphologic model and the geotechnical parameters.

The strength values obtained for the granite correspond to very high strengths, that of tuffs is low strength and very low for sandstones. These compressive strengths can be directly related to the retreat of the coastline.

The strength values obtained using the Schmidt hammer have limitations. On the rocks with high compressive strength, results lie out of scale, while low-strength rocks show higher than true values. However, there is a qualitative correspondence between the resistances values of the lithologies studied.

Keywords: *Erosion. Río Negro coast. Geotechnics. Schmidt hammer.*

INTRODUCCIÓN

El área de estudio corresponde a los sectores costeros del balneario Las Grutas y Piedras Coloradas, ambos localizados en el Golfo San Matías sobre la costa del Océano Atlántico, al nordeste de la provincia de Río Negro (Figura 1).

El balneario Las Grutas es un importante centro turístico de Patagonia que presenta una costa acantilada con gran cantidad de cuevas marinas, a cuyo pie se desarrollan amplias playas totalmente expuestas durante bajamar. El sector se encuentra en un área natural protegida reconocida como "Sitio Internacional de la Red Hemisférica de Aves Playeras". La costa está en retroceso y la acción antropogénica constituye un factor coadyuvante en el proceso erosivo, en relación con la importante expansión urbana de la localidad en los últimos treinta años (Kokot y Chomnalez 2012).

Piedras Coloradas, sitio ubicado unos cinco kilómetros al sur de Las Grutas, también constituye una importante atracción turística que se caracteriza por la presencia de amplias playas de arena y por una saliente rocosa donde afloran rocas graníticas de tonalidad rojiza que le dan nombre a la localidad. En este caso la costa no muestra un retroceso aparente.

El objetivo principal del presente estudio consiste en relacionar las tasas de erosión costeras del área con las características geotécnicas de los afloramientos involucrados en los procesos erosivos.

La cuantificación del retroceso costero del área fue realizada a partir de la reconstrucción histórica de la línea de costa por Kokot y Chomnalez (2012). Los datos geológicos y geomorfológicos fueron obtenidos a partir de sucesivos relevamientos, Kokot (1999), Kokot et al. (2004) y tareas de campo desarrolladas para este trabajo en el contexto de proyectos Ubacyt desarrollados en forma conjunta con el INTI.

A partir del conocimiento de las tendencias evolutivas del área de estudio, y del desarrollo de estudios geotécnicos cuantitativos se pudieron relacionar las características geológicas, geomorfológicas, estructurales y geotécnicas. Los resultados permiten vincular el retroceso costero con las características físicas y mecánicas de las rocas, los cuales sirven como base para el desarrollo de estudios de peligrosidad y riesgo geológico, con el fin de mejorar el manejo costero del área en un escenario susceptible a la erosión.

En el presente trabajo se analizan los factores geológicos que controlan el retroceso costero y la inestabilidad del acantilado teniendo en cuenta los parámetros marinos que influyen en el desarrollo de procesos de erosión costera.

METODOLOGÍA

El trabajo se desarrolló en tres etapas correspondientes a trabajos de gabinete, de campo y de laboratorio.

La primera etapa incluyó la recopilación, validación y análisis bibliográfico y cartográfico. En relación con las evidencias geomorfológicas del retroceso de la línea de costa se

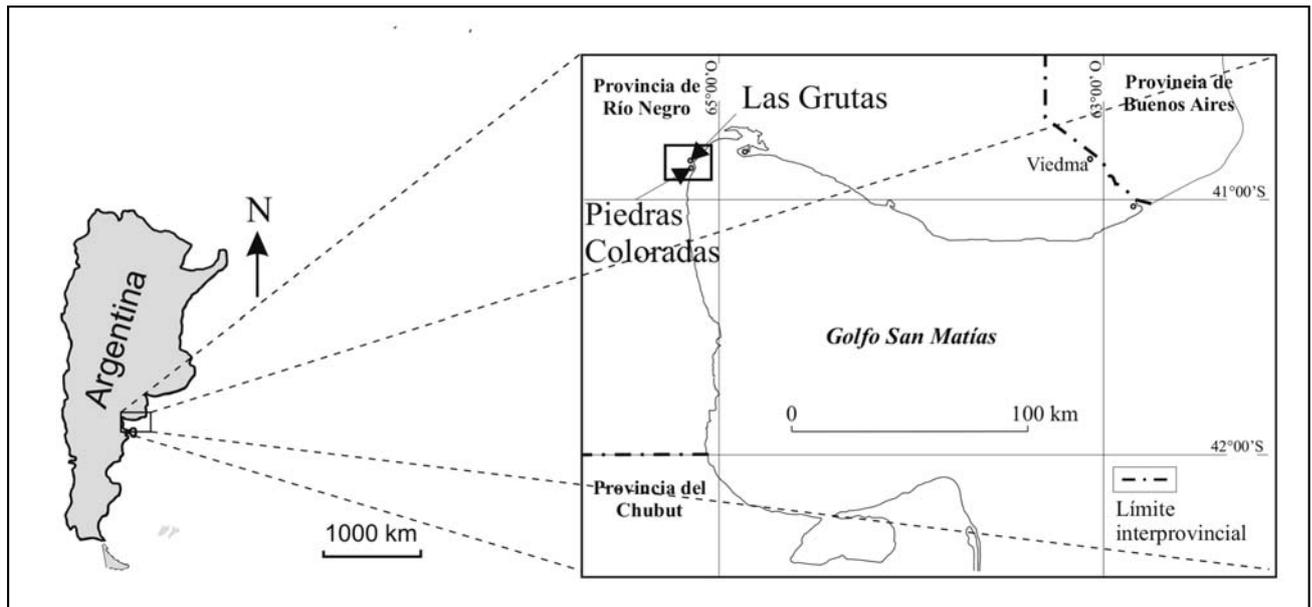


Figura 1. Mapa de ubicación.

indicaron zonas de mayor o menor retroceso costero, información obtenida de *Kokot y Chomnalez (2012)* que determinaron el retroceso de la línea de costa entre 1969 y 2008, a partir de registros fotográficos y satelitales. La separación entre costa y ribera se efectuó a partir de los criterios del U.S. Army Corps of Engineers (2002) y de *Kokot et al. (2011)*.

En la segunda etapa se relevaron distintas secciones del acantilado, efectuando esquemas estratigráficos y estructurales en una escala de trabajo 1:5.000. Se registraron alturas, pendientes, diaclasas (orientación y buzamiento), litologías, tipos de contacto estratigráfico y presencia de planos de estratificación en un perfil de detalle. Asimismo se obtuvieron aproximaciones a la resistencia uniaxial mediante la utilización de un Martillo de Schmidt calibrado para su uso en rocas y también de acuerdo al método *ISRM (1981)* con piqueta. En esta etapa se obtuvieron muestras de las rocas para el desarrollo de análisis y ensayos de laboratorio.

La tercera etapa correspondió al desarrollo de ensayos y análisis de testigos de rocas. La metodología utilizada para la realización de los ensayos mencionados precedentemente corresponde a normativa nacional e internacional (Tabla 1).

Tabla 1. Normativa utilizada para la realización de los ensayos.

Ensayo	Norma
Contenido de humedad	IRAM 10601
Absorción de agua	ASTM C-97
Densidad	ASTM C-97
Porosidad	ASTM C-97
Velocidad de ondas sísmicas	ASTM D 2845
Resistencia a la compresión	IRAM 10607

Para la interpretación de los valores de campo con el martillo de Schmidt, se tuvo en cuenta el valor del peso específico en seco de las muestras, según metodología de *González de Vallejo (2002)*.

Los resultados obtenidos en esta etapa permitieron ajustar el modelo geomorfológico con parámetros índices de la calidad de las rocas. Asimismo se comparan los datos de campo con los de laboratorio, con la finalidad de determinar la precisión del instrumental utilizado.

MARCO CONCEPTUAL

La erosión costera pone en juego un sistema de fuerzas, la fuerza de ataque originada por la acción marina y la fuerza de resistencia que depende de las propiedades intrínsecas del material (*Sunamura 1976, 1977, 1992*). La intensidad relativa de las dos fuerzas determina la posibilidad de erosión. Los sedimentos presentes en la ribera, que se interponen entre ambas fuerzas, favorecen la acción abrasiva pero en determinadas condiciones sirven de protectores o atenuadores de energía.

La energía de las olas está directamente relacionada con la fuerza de ataque (F_a) ejercida por las mismas en la base del acantilado y está afectada por: a) Nivel del mar, b) Topografía de la playa, plataforma litoral y del fondo de aguas poco profundas frente del acantilado que determina el tipo de rompiente de ola, c) Que el impacto de las olas sobre los afloramientos se produzca en coincidencia con la rompiente, d) Presencia de sedimentos de playa.

Las olas, al incidir en la base del acantilado, ejercen acción hidráulica y acción mecánica, debido a que pueden estar cargadas con sedimentos de playa. La acción hidráulica consiste principalmente en compresión, tensión y corte. Según *Brossard y Duperré (2004)* estas presiones se mantienen durante una fracción de segundo y generalmente son mucho menores que la resistencia a la compresión de la mayoría de las rocas. Si el acantilado tiene fallas o diaclasas abiertas, el aire en los intersticios es rápidamente comprimido, y como las olas

retroceden el aire comprimido se expande con fuerza explosiva ejerciendo tensiones a la salida.

La magnitud de la fuerza de ataque de olas (Fa) cambia cíclicamente, básicamente con el período de ola. Son escasas las mediciones directas de campo de la fuerza de ataque de olas debido a la complejidad del fenómeno involucrado y a la dificultad de medida.

La litología de los materiales que forman un acantilado, representa en parte su resistencia mecánica, la cual determina la fuerza de resistencia de los materiales (Fr) de un acantilado respecto a la incidencia de olas. La disminución de la fuerza de resistencia se debe a la presencia de discontinuidades en las rocas tales como los planos de estratificación, grietas, hendiduras, clivaje, diaclasas y fallas, ya sean estas características propias del afloramiento o adquiridas por tectonismo.

La resistencia de los materiales de un acantilado respecto a la fuerza de ataque de olas (Fa) se considera diferente de acuerdo a las condiciones espaciales y temporales. De acuerdo a Sunamura (1992), el parámetro más apropiado para expresar la fuerza de resistencia (Fr) es la resistencia a la compresión. La erosión se produce cuando la fuerza de ataque Fa es mayor que la fuerza de resistencia Fr. Si la fuerza de resistencia es mayor, no hay erosión, pero puede ocurrir que la fuerza de resistencia disminuya por meteorización y fatiga de las rocas (Figura 2). Por lo tanto, puede deducirse que el retroceso de un acantilado depende de tres variables: fuerza de ataque, fuerza de resistencia y tiempo.

Las velocidades de erosión son documentadas y registradas en muchos países. Los datos son promediados en períodos que van de 1 a 100 años y para que sean representativos, no deben ser puntuales sino que deben corresponder a tramos considerables a lo largo de la costa y los promedios son sumamente variables. En la Tabla 2 se presentan datos basados en las características litológicas que muestran que la litología y consolidación del material de un acantilado controlan el grado de erosión.

Tabla 2. Relación entre la litología y la velocidad de erosión, según Sunamura (1992).

Litología	Velocidad de erosión (m/año)
Rocas graníticas.	0,001
Calizas.	0,001 - 0,01
Lutitas.	0,01
Creta y rocas sedimentarias poco diagenizadas.	0,1 - 1
Depósitos cuaternarios.	1 - 10
Piroclastos inconsolidados.	10

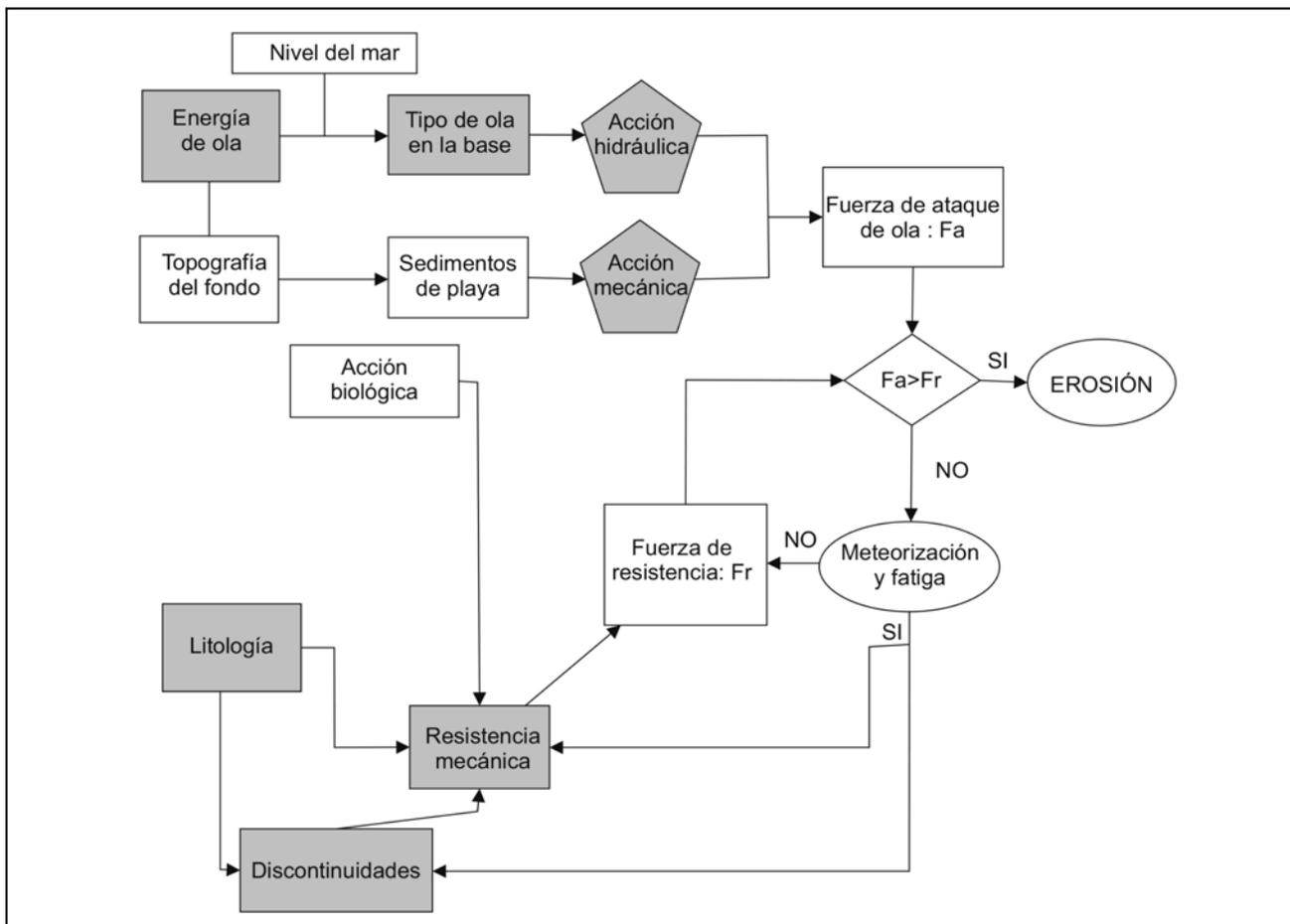


Figura 2. Erosión en un acantilado. Relación entre fuerza de ataque (Fa) y fuerza de resistencia (Fr). Modificado de Sunamura 1992.

Un indicador de la erosión de un acantilado es la presencia de una muesca que se extiende lateralmente en la base del mismo, donde su anchura es mayor que su altura. La velocidad de evolución depende del tipo de rocas, grado de meteorización, estructura y estado tenso-deformacional, de la energía y nivel de las olas que llegan a la base el acantilado y la cantidad de material abrasivo en movimiento por las olas en el sistema playa acantilado. La acción abrasiva se infiere fácilmente del hecho que la superficie de las rocas en el ámbito de la playa está pulida por esta acción.

Respecto a las fuerzas de compresión que se manifiestan cuando las olas atacan la cara del acantilado, existe disparidad respecto a la magnitud alcanzada por las mismas. *Rice (1983)* indica valores de presiones instantáneas de hasta 4,9MPa mientras que *Brossard y Duperret (2004)* indican que las presiones de impacto pueden alcanzar entre los 0,5 y 0,7 MPa. Cuando las olas rompen sobre un afloramiento generan presiones que se caracterizan por presentar un alto pico de presión seguida por una presión hidrodinámica más pequeña. Lo tiempos se miden en 0,0005 s y las magnitudes de presión por encima de los 0,69 MPa (*Brossard y Duperret 2004*). *Bullock et al. (1999)* mencionan presiones mayores a 0,435 MPa medidas en rompeolas.

Las fuerzas dinámicas de las masas de agua moviéndose también actúan sobre la línea de costa y se mencionan movimientos de bloques de concreto de 42 t por la acción de olas.

Un dato relevante es que la magnitud de la presión no está relacionada con la altura de la ola. En áreas donde se registraron alturas de ola mayores a 4,50 m, los más altos impactos de presión de 0,69 MPa fueron generados por olas de 2,5 m de altura. Investigaciones recientes confirman que la altura de la ola no genera las mayores magnitudes de presión sino que esta está determinada por el tipo de rompiente que determina el tiempo en que actúan estas presiones, con rompientes en voluta (*plunging waves*) generando los impactos más severos (*Wolters y Muller 2004*). El tipo de rompiente, en este caso olas en voluta, se origina con pendientes de fondo de 3° a 11° y la energía se concentra donde rompen las olas.

Respecto a la resistencia a la compresión simple de las rocas, *González de Vallejo et al. (2002)* presentan valores medios, destacándose la utilización de índices de campo que permiten una estimación de la resistencia uniaxial (*ISRM 1981*). En la Tabla 3 se observa la clasificación de las rocas respecto a su resistencia a la compresión simple.

CLIMA Y ASPECTOS OCEANOGRÁFICOS

El clima es árido a semiárido con lluvias escasas, donde el promedio de precipitaciones anuales no supera los 250 mm. Las temperaturas en verano oscilan entre los 14°C y 41°C y en invierno entre 2°C y 13°C. Los vientos predominantes vienen del sudoeste y son muy fuertes. Hay influencia de vientos oceánicos, más frecuentes en invierno, aportando mayor humedad al área donde es común la presencia de brumas.

En el Golfo San Matías las aguas son cálidas por la combinación de factores atmosféricos (calor del sol sobre las playas y las plataformas litorales durante la bajamar) y oceanográficos por el poco movimiento de las corrientes marinas.

Las mareas astronómicas, según Servicio de Hidrografía Naval (2012) corresponden a un régimen mareal semidiurno y a un ambiente macromareal, siendo las pleamares máximas pronosticadas de 9,43 m y las mínimas bajamares de 0,26 m. Los

Tabla 3. Clasificación de las rocas por su resistencia a la compresión simple (modificado de González de Vallejo 2002)

Resistencia a la compresión simple (MPa)	ISRM (1981)	Ejemplos
<1		Suelos
1-5	Muy blanda	Lutita, limolita, margas, toba, carbón
5-12,5	Blanda	
12,5-25		
25-50	Moderadamente dura	Esquisto, pizarra
50-100	Dura	Rocas metamórficas esquistosas, mármol, granito, gneiss, arenisca, caliza porosa.
100-200	Muy dura	Rocas ígneas y metamórficas duras, arenisca muy cementada, caliza, dolomía
>200		Cuarcita, gabro, basalto
>250	Extremadamente dura	

pronósticos corresponden al puerto patrón más cercano, San Antonio (Muelle Este). La oscilación diaria de marea para el Balneario de Las Grutas, según *Dragani et al. (2008)* es de aproximadamente 6 m en cuadraturas y mayor a los 9 m en sicigias.

Datos de olas, obtenidos del *Servicio Meteorológico Nacional (2013)*, indican que los valores de altura significativa de ola oscilan entre 0,5 m y 1,5 m con períodos de entre 7 s y 10 s. Las alturas de ola son mayores durante eventos de tormenta. Durante una sudestada ocurrida en febrero del año 2006, donde las olas arrastraron a bañistas del área (*Río Negro 2006*) las alturas superaron los 3m y acentuaron la erosión de los acantilados y la playa.

Las características oceanográficas del Golfo San Matías fueron estudiadas entre otros por *Escofet y Orensan (1977)*, *Scasso y Piola (1988)* y *Dragani et al. (2008)*. Describen al golfo como una extensa depresión litoral separada del mar adyacente por umbrales más o menos destacados. De las márgenes al centro, presenta bruscos aumentos de la profundidad y se asemeja a una gran bahía que comunica al este con el mar por una boca amplia de unos 100 km de ancho y entre 35 m y 55 m de profundidad. La geometría de la boca restringe el intercambio con el mar abierto y sus aguas resultan influidas por el forzado atmosférico (*Rivas, 1990*).

Respecto a sus aguas, la mayor salinidad y la menor temperatura se encuentran en las mayores profundidades, pero en general hacia la costa la temperatura aumenta y disminuye la salinidad por el aporte de agua dulce. En los meses de verano la temperatura ambiente es tan alta que gran parte del agua que ingresa a la bahía es evaporada. Esto a su vez produce un aumento en la salinidad marina.

Al analizar los datos de vientos y corrientes, obtenidos en la boya oceánica fondeada en Las Grutas, se puede saber acerca de la incidencia de los vientos sobre las corrientes, siendo estos predominantemente del oeste (*Moreira, 2008*).

La circulación de agua en el interior del Golfo San Matías sigue una dirección cerrada semejante a la de las agujas del reloj.

MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio es parte de la provincia geológica del “Macizo Norpatagónico” (*Harrington 1962*). Regionalmente, el relieve corresponde a una altiplanicie basáltica, donde se destacan los conos volcánicos, sierras y cerros que alcanzan los 1900 m.s.n.m., descendiendo de manera escalonada hacia el mar en donde la costa se caracteriza por ser acantilada.

La zona costera presenta un relieve de poca altitud, donde las mayores alturas se expresan en los acantilados marinos, que alcanzan unos 10 m de altura.

Las principales unidades geológicas que afloran en el área fueron descritas por *Porro y Fidalgo (1981)*, *Gelós et al (1993)*, *Martínez et al. (2001)*, *Kokot et al. (2004)* y *Kokot y Chomnalez (2012)*. Aflora la Formación Gran Bajo del Gualicho (*Lizuaín y Sepúlveda 1978*) que está bien expuesta en el frente acantilado y en la plataforma litoral, reconociéndose areniscas coquinoideas, arcillosas y calcáreas, con presencia de material tobáceo y abundantes niveles con yeso. Es notable también la presencia de estructuras sedimentarias y abundantes signos de bioturbación. Los colores, en general claros, varían entre castaño y gris amarillento. Son comunes también las tonalidades blanquecinas y verdosas. La unidad es de edad oligocena superior-miocena y su espesor, aflora sólo parcialmente en el área, es mayor a los 200 m (*Ramos 2000*).

Sobre la Formación Gran Bajo del Gualicho se apoya en discordancia erosiva la Formación Baliza San Matías (*Angulo et al. 1978*). Está constituida por conglomerados con matriz arenosa, con estratificación entrecruzada y valvas de moluscos. Se la adjudica al Pleistoceno inferior-medio (*Porro y Fidalgo 1981*) y los afloramientos de esta unidad se pueden encontrar en parte de la plataforma litoral frente a Las Grutas (*Martínez et al. 2001*).

Sobre los acantilados marinos y en discordancia erosiva se hallan depósitos de cordones litorales. Corresponden a depósitos de arenas y gravas con estratificación entrecruzada y donde es notable la presencia de bivalvos, siendo abundantes las valvas de *Amiantis* sp con ejemplares en posición de vida. Se hallan a una altura variable (entre 8 y 12 m.s.n.m.) El espesor de esta unidad, es mayor a los 2 m y se expone sobre los acantilados. Estos depósitos son pleistocenos (*Kokot y Chomnalez 2012*). Los depósitos de cordones litorales están casi totalmente cubiertos por depósitos eólicos holocenos, compuestos por arenas finas y medianas y se exponen en continuidad hacia la bahía de San Antonio por varios kilómetros hacia el sur de Las Grutas.

Parte del área está cubierta por depósitos coluviales, constituidos por gravas de rocas ígneas que cubren pedimentos y a su vez procedentes de las áreas más altas. Estos depósitos también están constituidos por clastos de las unidades adyacentes y por sedimentitas marinas y fluviales terciarias. Son limos, arenas, arcillas y gravas poco consolidadas. Al pie del acantilado y en forma discontinua se hallan depósitos de arena de playa.

En el balneario Piedras Coloradas, ubicado al sur de Las Grutas afloran granitos de grano fino y mediano de colores rosado y gris pertenecientes al Complejo Plutónico Pailmán (*Giacosa 1993*) y en parte cubiertos por arenas de playa. *Sato et al. (1998)* mencionan estos afloramientos como correspondientes al basamento ígneo-metamórfico y *Varela et al. (1997)* los denominan Leucogranitos de Las Grutas.

GEOMORFOLOGÍA

La línea de costa tiene una orientación general norte a sur que se expone a la acción de olas provenientes del este y del sudeste, predominando las segundas. Estas olas determinan un patrón de deriva litoral predominante hacia el norte. La costa se caracteriza por la presencia de acantilados marinos activos cuyas alturas alcanzan entre 8 y 10 m con presencia de cuevas marinas y en general presentan una muesca bien desarrollada que indican el límite de la erosión marina directa. El frente acantilado presenta evidencias de cruce de diaclasas y planos de estratificación que configuran condiciones de debilidad ante el ataque directo de las olas. La morfología del acantilado está condicionada por el cruce de estas diaclasas, mostrando un frente irregular, pero marcado por líneas rectas debido a este control estructural. Los acantilados marinos son geoformas de génesis compuesta, acción marina más remoción en masa, que encuentran condiciones favorables a partir de las mencionadas condiciones estructurales.

Es de fundamental importancia para caracterizar la dinámica del ambiente costero tener en cuenta la gran amplitud de mareas del área de estudio, que incrementa la exposición de los acantilados a la acción del oleaje. También es importante tener en cuenta el aumento de la altura de las olas durante los eventos de tormenta.

La acción antrópica influye en la evolución del acantilado a través del aumento de carga en el tope de los acantilados por construcciones y por aporte de agua. El frente acantilado presenta signos de escurrimiento subterráneo que se concentra sobre las capas más impermeables del paquete sedimentario. Esta situación es muy notable en la zona urbana, donde en relación con este escurrimiento crece vegetación que tapiza el frente acantilado, notándose la presencia de materia orgánica restringida a esta zona, lo cual indica su relación con el aporte de aguas servidas. Las condiciones geológicas / estructurales de los acantilados favorecen la caída de rocas. El disparador principal de estos eventos es el impacto de las olas sobre el frente acantilado, pero la vibración producida por el paso de vehículos también puede ser importante.

Al pie de los acantilados se halla una extensa plataforma litoral que por tramos es cubierta por una playa de arena. La erosión se desarrolla sobre afloramientos de la Formación Gran Bajo del Gualicho, muy meteorizada en la zona más alta, que presenta dos zonas claramente diferenciadas en el perfil analizado, una relativamente homogénea de aproximadamente 7 m de espesor con algunos horizontes tobáceos y por debajo un horizonte fosilífero con abundantes trazas. Este horizonte tiene un comportamiento mecánico distinto y es más susceptible a la erosión que el que se encuentra por encima. La plataforma litoral fue labrada sobre este horizonte fosilífero. Al pie, el acantilado presenta una muesca que tiene más de 1,00 m de altura e indica hasta donde llega la erosión marina.

La plataforma litoral actual presenta dos niveles, el más alto ubicado al pie del acantilado tiene unos 50 m de ancho, y el ubicado a unos 30 cm más abajo completa un ancho total de unos 270 metros (*Kokot y Chomnalez 2012*). Presenta como rasgos característicos, canales de erosión perpendiculares a la línea de costa y también aparecen resaltes debidos al control estructural que ejercen algunos bancos más duros. Sobre la misma se hallan bloques de variado tamaño, producto de la remoción en masa asociada con los procesos erosivos y algunos pilares marinos.

Sobre el acantilado se observa una plataforma litoral elevada sobre cuya superficie se observan diaclasas. Aún se observan rasgos de la superficie original, hoyos de marmita y canales, pero muy desdibujados por la meteorización y erosión subaérea. Sobre la misma se hallan cordones litorales areno gravosos con presencia de moluscos fósiles en buen estado de conservación. Dunas, que marcan el límite con el área urbana, cubren a los cordones litorales.

Kokot y Chomnalez (2012) compararon la posición de la línea de costa de Las Grutas entre los años 1969 y 2008 verificando que la misma retrocedió entre 1,00 m y más de 3,00 m en 39 años. Estos valores corresponden a velocidades medias de retroceso costero de 2,5 cm/año hasta 7,7 cm/año para ese período. En la zona céntrica de Las Grutas, el sector comprendido entre las denominadas Bajada 1 y Bajada 0 (Figura 3), es el que más se vio afectado por procesos erosivos, asimismo en la Bajada 2 el retroceso también fue importante. También la erosión fue mayor en relación con la presencia de las piletas que se efectuaron sobre la plataforma litoral.

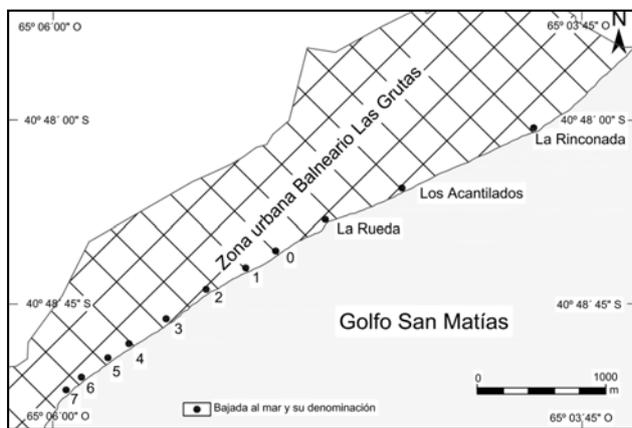


Figura 3. Ubicación de las bajadas a la playa en el Balneario Las Grutas.

Hacia el Este, a partir de la Bajada Los Acantilados y La Rinconada, el retroceso fue menor, alcanzando el valor de 1,00 m en 39 años.

Asimismo, el frente de las plataformas litorales retrocedió en forma no homogénea, pero superando la velocidad de retroceso del acantilado ya que en sectores de la zona céntrica retrocedió más de 8 m en los últimos 39 años a una velocidad promedio de unos 20 cm/año.

Al considerar la evolución costera, además del período considerado, deben tomarse en cuenta las variaciones del nivel del mar ocurridas durante el Cuaternario y las evidencias geológicas y morfológicas de dichas fluctuaciones. El nivel del mar osciló como consecuencia del accionar de múltiples variables, entre ellas las glaciostáticas y evidencia de ello es la presencia de terrazas marinas formadas durante los períodos interglaciares. Entre ellas, la terraza marina pleistocena correspondiente al Mis-5 y las terrazas marinas holocenas. Durante la última glaciación, hace unos 18000 años AP, el nivel del mar estaba unos 120 m por debajo del actual. En una etapa posterior y en relación con el fin del último período glaciario el nivel del mar se elevó rápidamente, superando hace unos 6000 años AP el nivel actual, en unos 6m. Luego el mar descendió hasta el nivel actual, pero no de manera continua. En relación con

estas oscilaciones se produjeron ingresiones y regresiones marinas que permiten reconstruir la historia geológica local.

El área costera de Las Grutas está ligada a la evolución geomorfológica de la Bahía de San Antonio, donde se registra la existencia de geoformas de acumulación marinas pleistocenas y holocenas ligadas a la ingresión marina sobre un gran bajo de deflación. Kokot y Chomnalez (2012) mencionan la existencia de cordones litorales pleistocenos en el área de Las Grutas, relacionados con la terraza marina pleistocena de San Antonio Oeste (Kokot y Favier Dubois 2009).

RESULTADOS

Caracterización, mediciones y toma de muestras in situ:

Se presenta un perfil de detalle (Figura 4) con la morfología del acantilado, caracterización de discontinuidades en el área de estudio y estimación de la resistencia a la compresión uniaxial según mediciones in situ efectuadas en las distintas facies reconocidas.

Observaciones efectuadas en el Balneario La Rinconada muestran un acantilado de tipo activo donde en la base aflora una roca con marcada estratificación horizontal, alto porcentaje de oquedades y fuerte bioturbación correspondiente a una arenisca con un espesor mínimo de 1,8 m denominada facies 1, la cual hacia el techo se encuentra en contacto con una roca de aspecto masivo correspondiente a una toba con un espesor de 7 m aproximadamente, denominada facies 2. Estas dos facies corresponden a la Formación Gran Bajo del Gualicho (Lizuaín y Sepúlveda 1978) y se ven afectadas por diaclasas. Dicha Formación se encuentra hacia el techo en contacto erosivo con un depósito de cordones litorales de 2 m de espesor aproximadamente y a su vez esta se encuentra, hacia el tope del perfil, en contacto erosivo con un depósito de dunas de espesor muy variable, que presenta en este sector, un espesor de al menos 10 m.

Se describió la estructura del perfil de detalle estudiado, la cual se caracteriza por la presencia de cuatro familias de discontinuidades, sumada a la estratificación primaria subhorizontal. Estas familias afectan a las facies 1 y 2 y se encuentran también en la plataforma litoral, lo cual indica que no son diaclasas de relajación. En la Tabla 4 se indica la orientación del acantilado y las principales discontinuidades y en la Figura 5 se representan en una red estereográfica.

Tabla 4. Orientación de las discontinuidades y del acantilado.

Discont / Acant	Azimut (°)	Í (°)
Acantilado	250	90
Familia 1	214	90
Familia 2	112	90
Familia 3	184	90
Familia 4	131	90

Cabe destacar que existe una variación de la inclinación de las discontinuidades subverticales a lo largo del acantilado mostrando inclinaciones menores.

Las características de las discontinuidades permiten definir que los mecanismos de ruptura más probables corresponden a la caída de rocas y a deslizamientos en cuña donde la

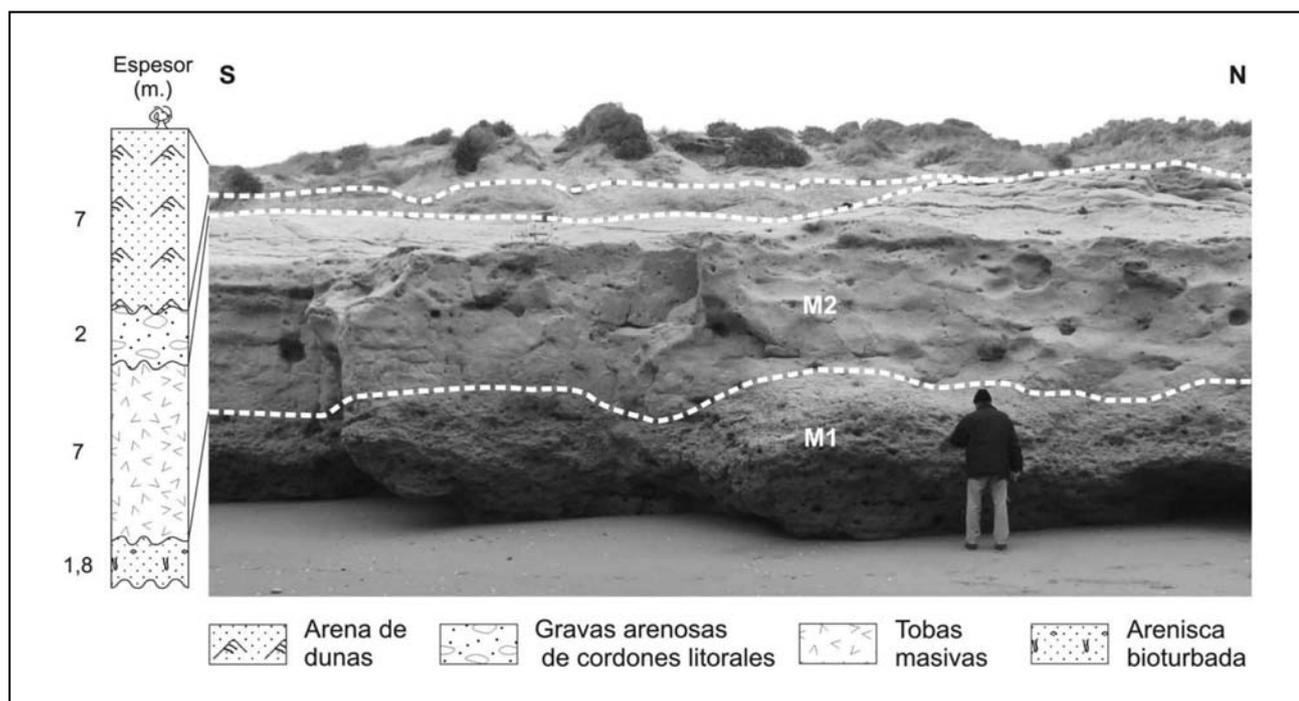


Figura 4. Perfil de detalle correspondiente al Balneario La Rinconada. Se ilustra la correspondencia entre la toma de muestras y la litología.

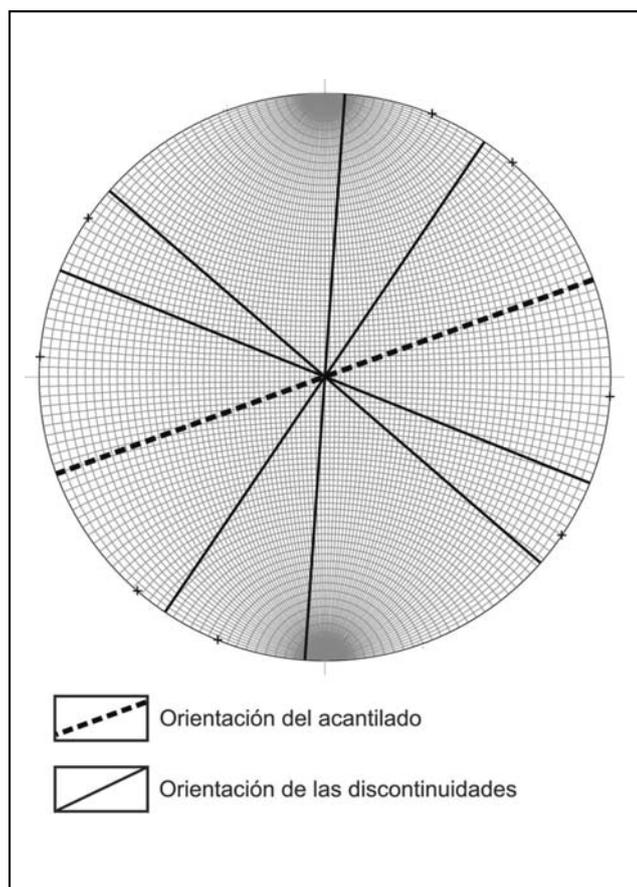


Figura 5. Representación estereográfica de las discontinuidades y del acantilado.

inclinación es menor a 90° . Se destaca el hecho de que estas discontinuidades favorecen la meteorización localizada por las influencias del agua de mar y el agua subterránea (en área urbana), esta conjunción de aspectos, sumada a la presencia de socavación al pie, constituye el principal factor de inestabilidad de estos acantilados.

La morfología del acantilado se caracteriza por presentar una muesca bien definida en el sector donde la facies 1 se encuentra expuesta a la zona de embate de olas y por otro lado una serie de cuevas con variada morfología y dimensiones donde la facies 2 se encuentra expuesta a la zona de embate de olas. La muesca es continua y presenta poca variación de la altura, 0,80 m aproximadamente.

Pueden observarse dos tipos de cuevas marinas, cuya génesis se atribuye a la erosión localizada en áreas de debilidad dadas por el cruce de diaclasas o por la intersección de diaclasas con planos de estratificación o discontinuidades horizontales. Los principales rasgos morfológicos del área acantilada y los dos distintos tipos de cuevas pueden observarse en la Figura 6.

Se obtuvo una aproximación de la resistencia uniaxial a partir de dos métodos expeditivos: determinación de la dureza relativa (ISRM 1981) y mediante la utilización de un esclerómetro, con las escalas indicadas en la Tabla 4, que permitieron obtener una aproximación al rango de resistencia a la compresión simple en los diversos sectores del afloramiento.

Para la caracterización geotécnica cuantitativa de los materiales involucrados en el fenómeno de erosión presente en la zona se tomaron tres muestras representativas. Dos muestras se extrajeron del sector de los acantilados del Balneario La Rinconada de Las Grutas (Figura 4) denominadas M1 y M2. El afloramiento correspondiente a la M1 se trata de un depósito clástico color gris, de 1,8 m de espesor mínimo y estratificación horizontal. Sobreyace al depósito anterior por medio de

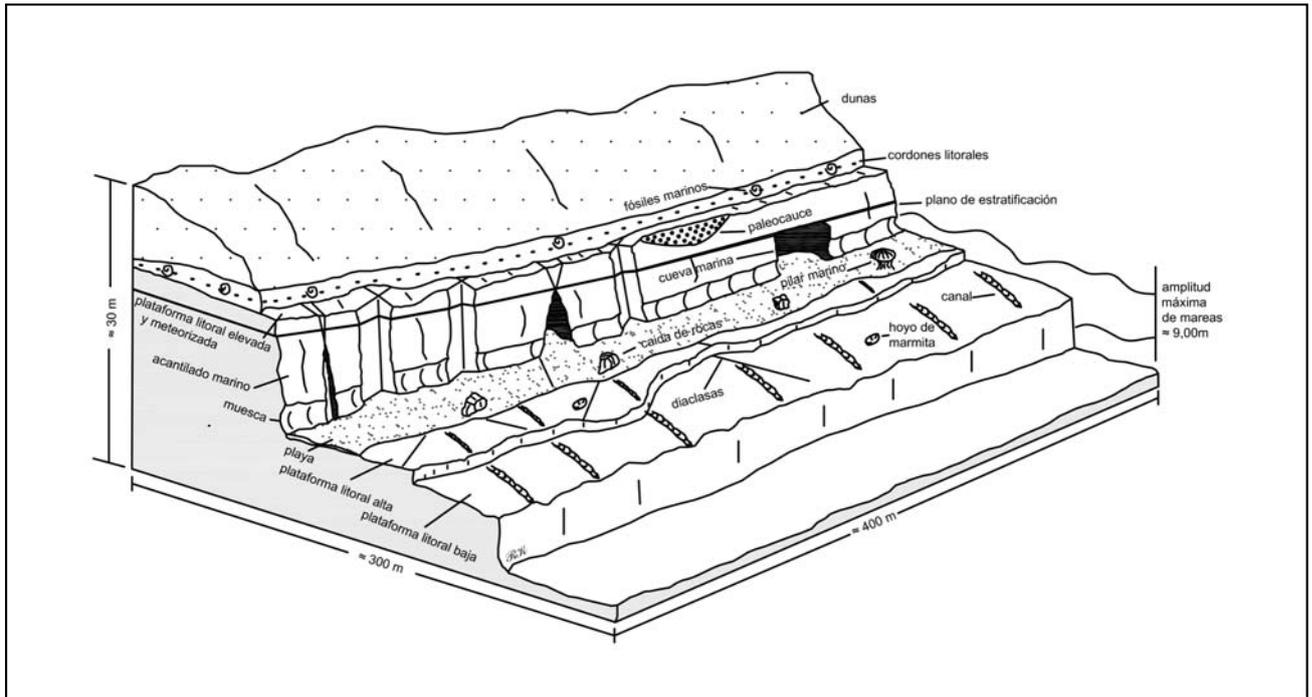


Figura 6. Principales rasgos morfológicos del área costera de Las Grutas.

Tabla 5. Estimación de la dureza relativa (ISRM 1981) y resistencia a la compresión simple por medio de un esclerómetro para rocas. * Se utilizó el diagrama de clasificación de las rocas teniendo en cuenta el valor de la densidad seca obtenido en laboratorio.

Muestra	Clase ISRM (1981)	Descripción	Identificación de Campo	Aprox. al rango de resistencia a compresión simple (MPa)	Resistencia a la compresión (MPa)*
M1	R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo	1-5	42
M2	R1	Roca muy blanda	La roca se desmenuza al golpear con la punta del martillo	1-5	60
M3	R5	Roca muy dura	Se requieren muchos golpes con el martillo para fracturarla	100-250	275

un contacto erosivo, otro volcániclastico de aspecto masivo con un espesor de 7 m y de color gris claro, correspondiente a la muestra M2. La tercera muestra (M3), de composición granítica se extrajo del paraje Piedras Coloradas, y corresponde al Granito Piedras Coloradas (Sato et al. 1998) que consiste en un afloramiento de escaso relieve y extensión areal configurando una saliente en un área de costa rectilínea. El procedimiento para extracción de muestras fue mediante el hincado de puntas de acero en diferentes direcciones y extracción de bloques irregulares de roca.

Resultados de laboratorio:

Se realizó una descripción cuantitativa de las propiedades de la matriz rocosa, tanto de propiedades de identificación y clasificación como de propiedades mecánicas, las cuales presentan información relevante para fines geotécnicos. Los ensayos realizados en el laboratorio tuvieron como objetivo determinar la petrografía, el contenido de humedad, la porosidad, la absorción de agua, la densidad específica, resistencia a la compresión

simple y velocidad de ondas sónicas. Para el desarrollo de estos estudios, las muestras llegadas al laboratorio fueron caladas en forma de testigos cilíndricos con broca diamantada, posteriormente con disco diamantado fueron paralelizadas las bases para la ejecución de los ensayos (Figura 7).

Se realizaron las descripciones petrográficas de las tres muestras estudiadas (Figura 8).

Muestra M1: Arenisca cuarzosa, matriz sostén: Compuesta de areniscas cuarzosas bien seleccionadas de grano fino, subredondeados, con elevada porosidad y permeabilidad. En la fracción clástica (80% del total de la roca), el cuarzo es el componente mayoritario (55%). Dentro de los feldespatos (30%), predominan plagioclasa y ortosa. Los fragmentos líticos (10%), corresponden a rocas sedimentarias, deformados y con contornos difusos. Se observan láminas micáceas (5% de la fracción clástica). La matriz (20%) del depósito corresponde a arena muy fina. La porosidad es moderada y estaría principalmente constituida por microporos alojados en el material arcilloso. Se observa la presencia de bioclastos (o fósiles).

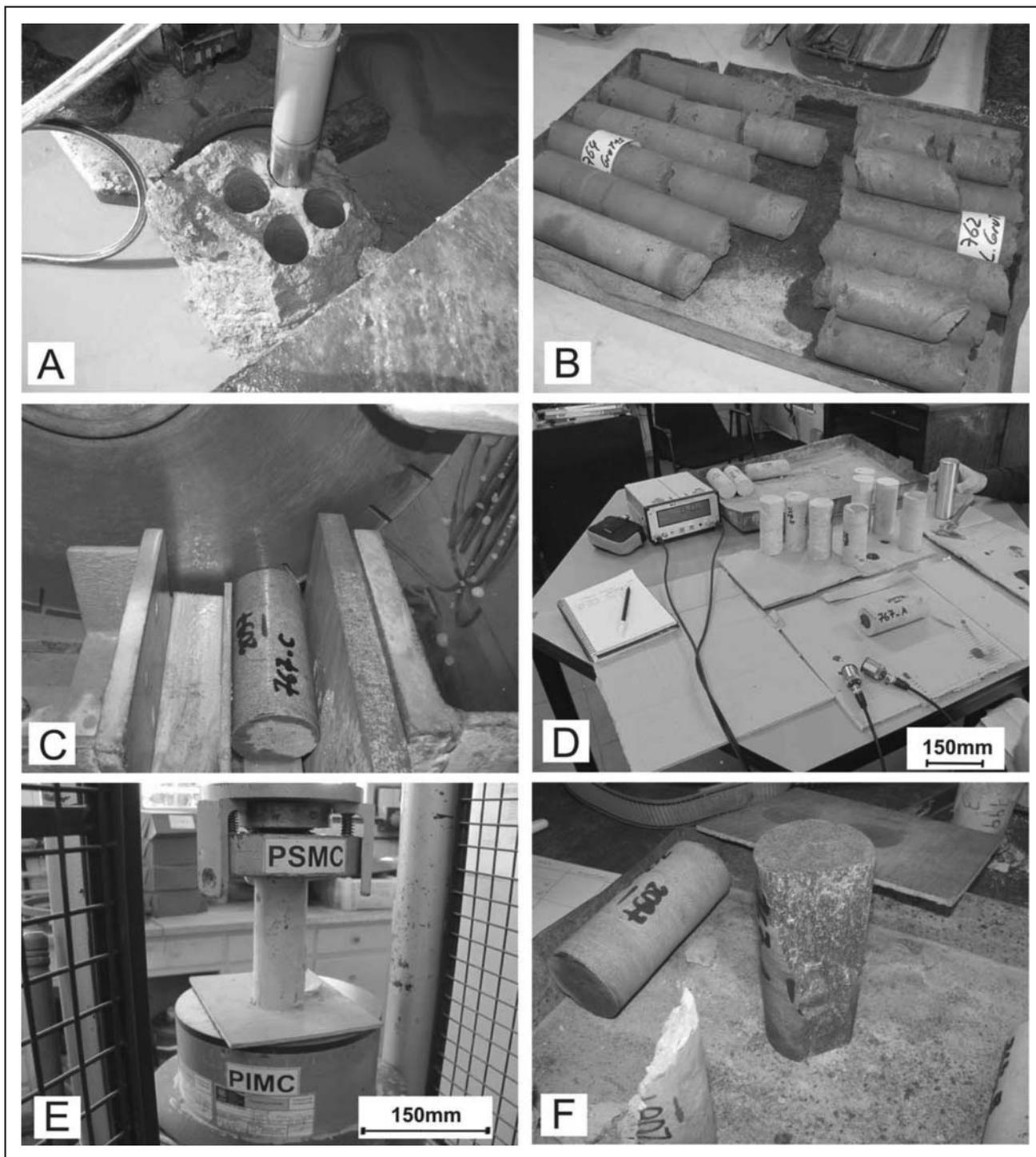


Figura 7. A) Extracción de testigos, B) Testigos, C) Paralelizado de bases, D) Propagación de ondas sísmicas, E) Ensayo de compresión simple, F) Rotura de Testigos.

Muestra M2: Toba lapillítica masiva: Está formada por una matriz de grano fino, fragmentos de cristales y líticos. Los cristaloclastos poseen tamaños menores al milímetro. Los litoclastos son menos abundantes que los cristaloclastos. La matriz es de color blanco y parece ser vítrea. Al microscopio, se observan cristaloclastos, vitroclastos y litoclastos inmersos en una matriz vítrea, formada principalmente por polvo y ceniza volcánica. La proporción de matriz y porfiroclastos es similar, con trizas de moderado grado de soldadura. Los fragmentos vítre-

os (55%) corresponden a fragmentos de trizas y pómez, las mismas constituyen parte de la fracción piroclástica mas fina de la roca. Los cristaloclastos (35%) están representados por cuarzo, que es el más abundante, plagioclasa y biotita. Además, se observan óxidos de hierro. Los fragmentos líticos son escasos (10%), corresponden a litoclastos de rocas sedimentarias.

La matriz de la roca es vítrea. Está formada principalmente por polvo y ceniza volcánica.

Muestra M3: Granito: Este granito se caracteriza por ser de color rosado con textura granosa fina constituida por plagioclasa, cuarzo, feldespato potásico y minerales máficos cuyos tamaños oscilan ente 0,5 y 2 milímetros. Microscópicamente, la roca posee textura granosa alotriomorfa predominantemente con sectores donde se observa una textura aplítica, constituida por plagioclasa, cuarzo y feldespato potásico. Como mineral accesorio característico se presenta biotita y junto con otros menores como epidoto y opacos distribuidos en forma homogénea. Son anhedrales y subhedrales de tamaños menores al milímetro. En algunos sectores se observan como crecimiento primario, agregados microcristalinos de feldespato potásico y cuarzo.

El contenido de humedad se determinó bajo la Norma IRAM 10601 (1986) en la cual se obtiene el contenido de agua de la muestra por secado en estufa. La muestra es un trozo irregular de roca.

Los parámetros de absorción de agua, densidad y porosidad se obtuvieron sobre la base de la norma ASTM C-97 (2009), en la cual se miden el peso seco, saturado suspendido y saturado con superficie seca. La muestra corresponde a testigos

cilíndricos de 54 mm de diámetro y 150 mm de longitud aproximadamente.

La velocidad de propagación de ondas sísmicas se determinó bajo la Norma ASTM D 2845 (2008) en la cual se mide el tiempo que tardan los pulsos de ondas en atravesar los testigos. El equipo utilizado corresponde al modelo V-Meter MK II, de la marca James Instruments con un rango de medición de 0,1 microsegundos hasta 6400 microsegundos La muestra corresponde a testigos cilíndricos de 54 mm de diámetro y 150 mm de longitud aproximadamente.

La resistencia a la compresión simple se obtuvo siguiendo la metodología de la Norma IRAM 10607 (2008) en la cual se determina la presión a la cual rompen los testigos cuando se someten a la carga de una prensa. Para la obtención de muestras saturadas en agua, el tiempo de inmersión fue de 48 hs. El equipo utilizado corresponde a una prensa para ensayos mecánicos de compresión simple, Marca CIFIC, con escalas de trabajo 0-2000 kN y 0-200 kN y de resolución de 0,1 kN y 0,01 kN. La muestra corresponde a testigos cilíndricos de 54 mm de diámetro y 150 mm de longitud aproximadamente.

En la Tabla 6 se presentan los resultados de los parámetros geotécnicos analizados para las tres muestras.

Tabla 6. Resultados de laboratorio de muestras representativas del área de estudio.

Parámetro Muestra	Contenido de humedad (%)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente seca (g/cm ³)	Porosidad (%)	Velocidad de ondas sísmicas (m/s)	Resistencia a la compresión simple-seca (MPa)	Resistencia a la compresión simple-saturada (MPa)
M1	23,2	49,70	1,19	58,96	842,7*	1,9	---**
M2	25,1	49,03	1,11	54,56	1135,0	3,9	1,1
M3	0	0,32	3,06	0,98	5630,9	130	121

* Los valores menores a 900 m/s son indicativos de rocas alteradas y/o meteorizadas

** Las probetas en condición saturada se disgregaron completamente.

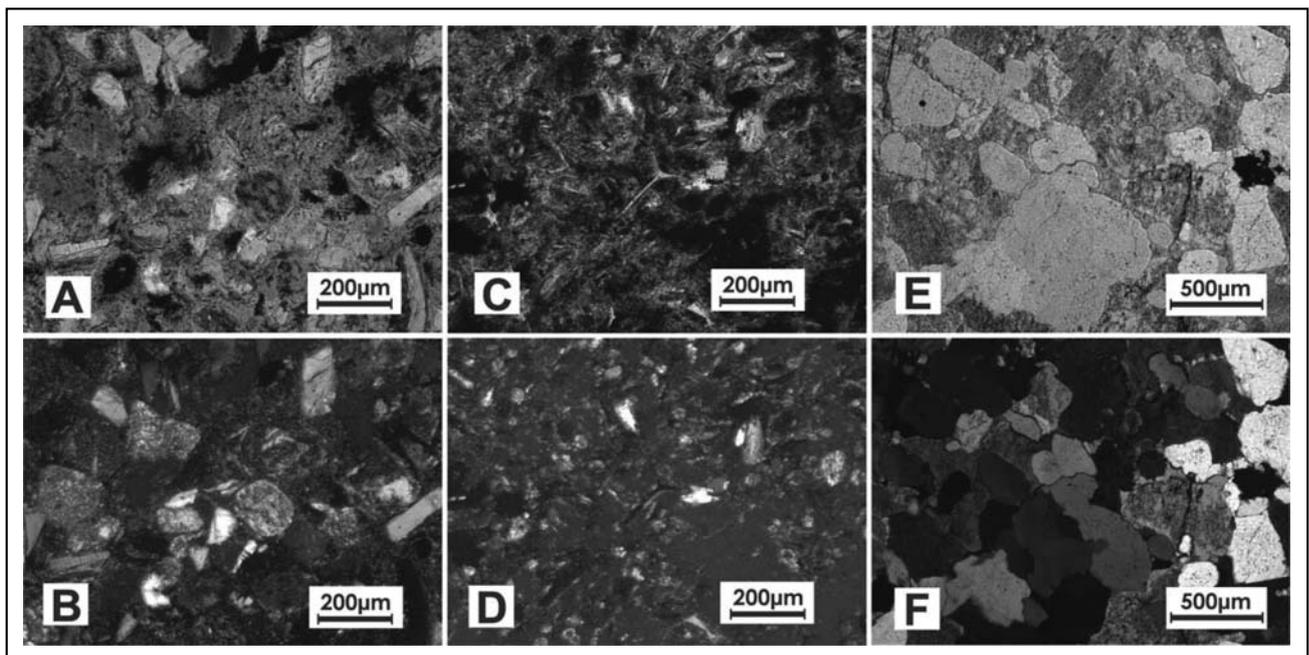


Figura 8. Microfotografías de las muestras con una magnificación de 100x y 50x. A) M1 sin polarizador, B) M1 con polarizador, C) M2 sin polarizador, D) M2 con polarizador, E) M3 sin polarizador y F) M3 con polarizador.

DISCUSIÓN

Los resultados permiten desarrollar una serie de consideraciones:

Como era de esperarse los valores de la resistencia uniaxial y los de velocidad de propagación de ondas sínicas presentan una correlación de tipo lineal.

Los valores de la resistencia a la compresión uniaxial de M1 y M2 son muy bajos, pero existe una diferencia entre ambos del orden de un 50 %. Teniendo en cuenta que las demás propiedades analizadas presentan valores muy similares, se infiere que la diferencia mencionada correspondiente a la matriz rocosa, está dada exclusivamente por la composición litológica.

El comportamiento del macizo rocoso, condicionado por las discontinuidades, se ve afectado por condiciones estructurales muy similares, exceptuando la estratificación horizontal más importante para la facies 1.

Los valores del contenido de humedad, permiten obtener una primera aproximación a los valores de grado de saturación de las rocas expuestas al agua de mar, arrojando valores de un 50% aproximadamente, indicando una afectación homogénea de la Formación Gran Bajo del Gualicho. Sin embargo en el área céntrica (bajadas 2 a 7) las rocas se encuentran

saturadas la mayor parte del tiempo por aporte de aguas urbanas.

A partir de los resultados expuestos en la tabla 6 puede deducirse que en el caso de las tobas la disminución de la resistencia a la compresión simple en condición saturada es de un 71,8% y en las areniscas la resistencia disminuye aún más.

La comparación de los resultados de dos localidades con litologías distintas permitió testear la correspondencia entre resistencia a la erosión dada por la resistencia a la compresión simple y el retroceso costero. El sector denominado Las Grutas norte corresponde a las bajadas de La Rueda y Los Acantilados, mientras que el sector sur corresponde a las bajadas restantes (Figura 3)

Los valores de resistencia obtenidos para los granitos corresponden a resistencias muy altas, en tanto que para las tobas son bajos y para las areniscas muy bajos. Estos bajos valores de resistencia a la compresión simple se relacionan directamente con el mayor retroceso de la línea de costa (Tabla 7).

La zona céntrica se corresponde con un macizo rocoso afectado por la presencia de agua de origen antrópico, mayor meteorización y una matriz rocosa con muy baja resistencia a la compresión simple mientras en la zona de La Rueda tiene una mayor resistencia a la compresión simple de la matriz rocosa.

Tabla 7. Tasas de erosión en relación con la litología.

Localidad	Tasa de erosión 1969 -2008 (cm/año)	Litología	Resistencia a la compresión simple (MPa)	Resistencia a la compresión simple saturada (MPa)
Piedras Coloradas	Muy baja	Granito	130	121
Las Grutas sur	7,7	Arenisca	1,9	Muy baja
Las Grutas norte	2,5	Toba	3,9	1,1

CONCLUSIONES

- Los sectores constituidos con rocas de mayor resistencia a la compresión simple indicaron un menor retroceso de la línea de costa durante el período estudiado: en el área de Piedras Coloradas la costa no muestra un retroceso apreciable, mientras que en el balneario Las Grutas el retroceso costero es mayor, diferenciándose dos zonas: zona sur con máximo retroceso costero y zona norte donde el retroceso costero es un poco menor.
- El retroceso costero está influido en mayor medida por la resistencia a la compresión simple de los afloramientos, en correspondencia directa con la litología.
- Los valores de resistencia a la compresión simple obtenidos son: Granitos 130 MPa, Tobas 3,9 MPa y Areniscas 1,9 (MPa)
- En zonas de litología homogénea se observó que la mayor erosión coincide con sectores donde las rocas se encuentran saturadas de agua.
- Los valores de resistencia a la compresión simple se ven influidos en gran medida por la elevada porosidad y absorción de agua, de las rocas aflorantes en la zona de

Las Grutas. En el caso de las tobas la disminución a la resistencia a la compresión simple en condición saturada es de un 71,8% y en las areniscas es aún mayor.

- Los valores obtenidos a partir del uso del esclerómetro presentan limitaciones. Respecto a las rocas con altos valores de resistencia a la compresión simple los resultados salen de escala y en las rocas de baja resistencia dan valores mayores que los reales. Sin embargo existe una correspondencia cualitativa entre los valores de resistencia de las litologías estudiadas.
- Es importante la influencia del grado de meteorización y la humedad de los afloramientos que presentan las rocas cuando se estima la resistencia con el martillo de Schmidt. No ha habido dispersión en los valores obtenidos en el campo.
- A partir del conocimiento de las tendencias evolutivas del área de estudio, y el desarrollo de estudios geotécnicos cuantitativos se pudo relacionar las características geológicas, geomorfológicas, estructurales y geotécnicas. Los resultados son de utilidad para el desarrollo de estudios de peligrosidad y riesgo geológico con el fin de mejorar el manejo costero del área en un escenario susceptible a la erosión.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ANGULO, R., FIDALGO, F., GÓMEZ PERAL, M., Y SCHNACK, E., 1978.
Las ingresiones marinas Cuaternarias en la Bahía de San Antonio y sus vecindades, provincia de Río Negro.
Actas 7º Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires, 271-283.
- ASTM C 97, 2009.
Standard Test Methods for Absorption and Bulk Specific Gravity of Dimension Stone.
- ASTM D 2845, 2008.
Standard Test Methods for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants of Rocks.
- BROSSARD, J. Y DUPERRÉ, A., 2004.
Coastal chalk cliff erosion: experimental investigation on the role of marine factors.
En: Mortimore, R. N. y Duperret, A. (eds) 2004. Coastal Chalk Cliff instability (v. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications) 20, 109-120.
- BULLOCK, G.N., HEWSON, P., CRAWFORD, A.R. Y BIRD, P.A.D., 1999.
Field and laboratory measurements of wave loads on vertical breakwaters.
Proceedings Coastal Structures, 99, Santander, Spain, 613-622.
- DRAGANI, W., SPERONI, J. Y D'ONOFRIO, E., 2008.
Estudio de la circulación de las aguas del golfo San Matías mediante la aplicación de modelos numéricos hidrodinámicos forzados con marea y viento.
Sub-proyecto a-b-30 (GEF-Patagonia). 23a Reunión Científica de Geofísica y Geodesia (AAGG), Ciudad de Bahía Blanca, 25 p.
- ESCOFET, A; ORENSANZ, O., 1977.
Biocenología Bentónica del Golfo San Matías (Río Negro, Argentina): Metodología, experiencias y resultados del estudio ecológico de un gran espacio geográfico en América Latina.
Análisis del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 18 p.
- GELÓS, E., SCHILLIZZI, R., Y SPAGNUOLO, J., 1993.
El Cenozoico de la costa norte del Golfo San Matías, Río Negro.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 47: 135-140.
- GIACOSA, R., 1993.
El ciclo eruptivo Gondwánico en el área de Sierra Pailemán, Macizo Nordpatagónico, Argentina.
Duodécimo Congreso Geológico Argentino y Segundo Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Actas 4: 113-119.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., FERRER, M., ORTUÑO, L. Y OTEO C., 2002.
Ingeniería Geológica.
Pearson Educación, 744 pp. Madrid.
- HARRINGTON, H., 1962.
Paleogeographic development of South America.
American Association of Petroleum Geologists, Bulletin 46: 1773-1814.
- IRAM 10601, 1986.
Mecánica de rocas.
Método de determinación de agua.
- IRAM 10607, 2008.
Geotecnia.
Método de determinación de la resistencia a la compresión uniaxial, del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson en probetas de roca.
- ISRM, 1981.
Rock Characterization. Testing and monitoring. ISRM suggest methods. (E.T. Brown Ed.).
International Society for Rocks Mechanics. Pergamon Press, 211pp. Oxford.
- KOKOT, R., 1999.
Cambio climático y evolución costera en Argentina.
Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 2Vol, 254 pp.
- KOKOT, R. Y CHOMNALEZ, F., 2012.
Retroceso de la línea de costa en Las Grutas, provincia de Río Negro.
Revista de la Asociación Geológica Argentina. 69(1): 88-96.
- KOKOT R.R. Y FAVIER-DUBOIS, C.M., 2009.
Evolución geomorfológica de la bahía de San Antonio (Río Negro, Argentina). Su importancia para el registro de ocupaciones humanas.
IV Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología. XII Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário. II Reunión sobre el Cuaternario de América del Sur, p 125. La Plata.

- KOKOT, R., ANGARAMO, D. Y VALLADARES, A., 2011.
Costa y ribera en Claromecó.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 68: 71-83.
- KOKOT, R., CODIGNOTTO, J. Y ELISSONDO, M., 2004.
Vulnerabilidad de la Costa de la Provincia de Río Negro al Ascenso del Nivel del Mar.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59: 477-487.
- LIZUAIN, A., Y SEPÚLVEDA, E., 1978.
Geología del Gran Bajo del Gualicho, Provincia de Río Negro.
Actas 7º Congreso Geológico Argentino. Buenos Aires, 407- 422.
- MARTÍNEZ, H., NÁÑEZ, C., LIZUAIN, A., DAL MOLIN, C. Y TUREL, A., 2001.
Hoja Geológica 4166-II, San Antonio Oeste. Provincia de Río Negro.
Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino.
Boletín 254, 32 p., Buenos Aires.
- MOREIRA, D., 2008.
Estudio de la circulación en los Golfos Norpatagónicos.
Tesis de Licenciatura en Oceanografía. Ciencias. de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- PORRO, N., Y FIDALGO, F., 1981.
Descripción geológica de la Hoja 39j, San Antonio Oeste, Provincia de Río Negro.
Servicio Geológico Nacional (inédito), 542 pp., Buenos Aires.
- RICE, E R.J., 1983.
Fundamentos de Geomorfología.
Paraninfo. 392 pp. Madrid.
- RIO NEGRO, 2006.
Río Negro y Neuquén - Patagonia Argentina on line.
Disponible en <http://www1.rionegro.com.ar/arch200602/08/v08j50.php>, último acceso 15 de abril de 2013.
- RIVAS, A., 1990.
Heat balance and annual variations of mean temperature in the North-Patagonian gulfs.
Acta Oceanológica, 13 (3): 265-272.
- SATO A.M., TICKY H. Y LLAMBIAS E.J., 1998.
El Basamento Igneo-Metamórfico del Área de Las Grutas, Provincia de Río Negro, Argentina.
Xº Congreso Latinoamericano de Geología y VIº Congreso Nacional de Geología Económica, Actas 1: 65-70, Buenos Aires.
- SCASSO, L. Y PIOLA, A., 1988.
Circulación en el Golfo San Matías, 33-51.
Servicio de Hidrología Naval, Departamento de Oceanografía. GeoActa Vol. 15, Nº1.
- SERVICIO DE HIDROLOGÍA NAVAL, 2012.
Tablas de Marea. Servicio de Hidrografía Naval.
En: <http://www.hidro.gob.ar/Oceanografia/Tmareas>
- SUNAMURA, T., 1976.
Feedback relationship in wave erosion of laboratory rocky coast,
The Journal of Geology, 84, 427-437.
- SUNAMURA, T., 1977.
A relationship between wave-induced cliff erosion and erosive force of waves,
The Journal of Geology, 85, 613-618.
- SUNAMURA, T., 1992.
Geomorphology of Rocky Coasts.
John Wiley & Sons, 302 p. Chichester.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 2002.
Coastal Engineering Manual (CEM), (6 Vols.).
Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.
- VARELA, R., CINGOLANI, C., SATO A., DALLA SALDA, L., BRITO NEVES, B.B., BASEI, M.A.S., SIGA JR, O. Y TEIXEIRA, Y.W., 1997.
Proterozoic and Paleozoic evolution of Atlantic area of North-Patagonian Massif, Argentina.
South-American Symposium on Isotope Geology, Acta: 326-329, San Pablo.
- WOLTERS, G. Y MULLER, G., 2004.
The propagation of wave impact induced pressures into cracks and fissures.
In: Morymore, R.N. y Duperret, A. (eds.) *Coastal Chalk Cliff Instability*, Geological Society, London, *Engineering Geology Special Publication*, 20, 121-130.



Estimaciones, simulaciones y la influencia de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba

Estimates, simulations and the influence of expertise in the prediction of the collapsibility of loessial soils in the city of Cordoba

Rocca, R.J. ¹ ✉ - Terzariol, R.E. ¹ - Zeballos, M.E. ¹

Recibido: 20 de Noviembre de 2012 • Aceptado: 10 de Mayo de 2013

Resumen

Los suelos loessicos de la ciudad de Córdoba se extienden a ambos márgenes del río Suquía y abarcan unas 30.000 hectáreas. Estos suelos macroporosos tienen distinto grado de colapsibilidad por humedecimiento, que va desde aquellos capaces de autocolapsar bajo su propio peso hasta los potencialmente colapsables que requieren de la acción de cargas externas para que se produzca el fenómeno.

Uno de los problemas que aún persiste está relacionado con la distribución areal, debido a que no es factible contar con suficientes datos como para tener mapas de alta confiabilidad.

Entre las soluciones posibles para cubrir las áreas no prospectadas, se encuentran el uso de métodos de extrapolación por medio de estimaciones geoestadísticas y simulación estocástica.

Otra manera de tratar el tema se refiere al empleo de información subjetiva, de acuerdo con la experiencia de los especialistas y su intuición en el tema. Existen métodos para combinar esa experticia con datos numéricos mediante actualización bayesiana.

Se analizan los resultados empleando SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), cuya versión 5, recientemente presentada en 2008, permite la implementación de todos los procedimientos, en un ambiente relativamente sencillo para el usuario.

Se han valorados distintos sectores de la ciudad, cuyas antecedentes generales presentan diferente grado de colapsibilidad definidos según criterios bien reconocidos. Los resultados obtenidos han sido contrastados con información independiente que no ha participado en los cómputos.

¹. Área Geotecnia, FCEfyn. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina

✉ rjrocca@efn.uncor.edu

Se comentan las dificultades encontradas en la resolución del mapeo y las limitaciones generales y particulares referidos a los métodos y a su implementación.

Palabras clave: loess-colapsibilidad-Córdoba-actualización-variabilidad.

Abstract

Loess soils of Cordoba city extend to both sides of the Suquia river and cover 30000 hectares. These macroporous soils have different degrees of collapsibility upon wetting, ranging from self-subsident under its own weight up to potentially collapsible, requiring external loads.

One problem that persists is related with the areal distribution, because it is not feasible to have enough data to generate maps with high reliability.

Among possible solutions to cover areas not prospected, are the uses of extrapolation methods using geostatistical estimates and stochastic simulation.

Another way to address the issue relates to the use of subjective information, according to the experience of experts and their intuition on the subject. There are methods to combine that expertise with numerical data using Bayesian updating.

The problem is analyzed using SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance), whose version 5, recently introduced in 2008, allows the implementation of all the procedures in a relatively simple way for the user.

Different sectors of the city have been valued, whose general background have different levels of collapsibility defined by well recognized criteria. The results have been contrasted with independent data that has not participated in the computations.

It is discussed the difficulties encountered in the resolution of mapping and general and specific limitations relating to the methods and their implementation.

Keywords: loess-collapsibility-Cordoba-updating-variability.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Córdoba tiene una importante extensión de su superficie con suelos de origen loésico, que ocupan las planicies situadas fuera del valle del río Suquia. (Bodenbender, 1890, Reginatto, 1970, Quintana Crespo, 1991, Rocca et al. 1990, Rocca et al 1999, Rocca 2004, Rocca 2006).

La ciudad se ha expandido desde su posición original en el valle hacia las planicies norte y sur (formadas por suelos loésicos Zonas 4 y 5. Figura 1, Rocca et al 1999) y las construcciones han ido tomando contacto con este tipo de suelos. Esto se ha acelerado a mediados del siglo XX.

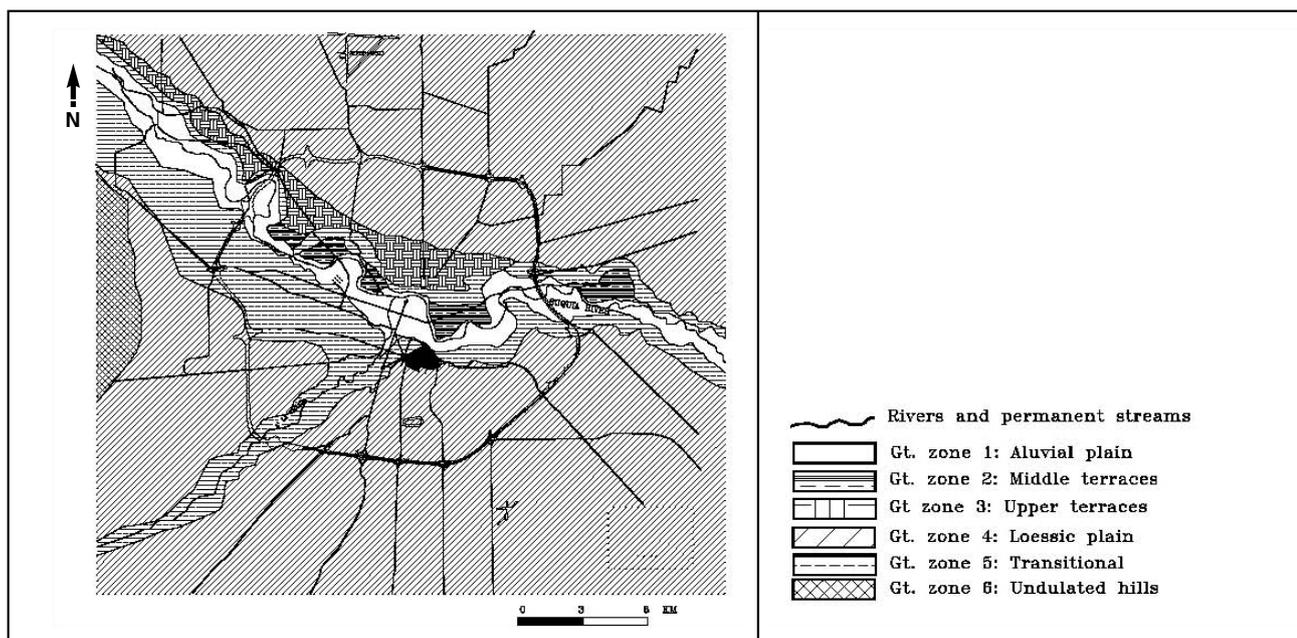


Figura 1. Características de los suelos presentes en la ciudad de Córdoba (según Rocca et al 1999)

Los loess tienen variado comportamiento areal de acuerdo a los distintos tipos de estructuras internas, cementaciones y espesores presentes. El grado de conocimiento de los espesores loessicos es muy limitado y ha sido estudiado en algunos sectores de la ciudad donde existen perforaciones profundas (Rocca et al. 1996). En el sector Norte, próximos al aeropuerto se han excavado pozos de unos 100 metros. En el sector Sur, son relativamente común la construcción de pozos absorbentes del orden de 35 metros de profundidad.

La estructura interna macroroporosa de los loess se caracteriza por ser colapsable y por lo tanto, se han generado numerosos problemas y daños en las construcciones fundadas en forma directa.

Para analizar ese problema, existen métodos estadísticos que simplifican la cuantificación de los asentamientos de las fundaciones directas generados por construcciones de una a tres plantas (Rocca, 2006).

Para diferenciar los distintos tipos de loess se puede emplear la Relación de Colapsabilidad, $RC = P_f/P_o$. Esta expresión vincula la presión de fluencia, P_f , obtenida en ensayos edométricos con la presión de cobertura del terreno, P_o (Rocca et al, 1990). Así se pueden distinguir dos tipos básicos de comportamiento: cuando RC es menor que 1, son loess autocolapsables, mientras que cuando RC es mayor que 1 son loess potencialmente colapsables.

La mayoría de los loess requiere de cargas exteriores para colapsar, o sea son potencialmente colapsables.

En el cálculo de los asentamientos por colapso de un perfil de suelos, hay que integrar en profundidad, los asentamientos de los estratos con sus características de colapsabilidad

Con los perfiles analizados, se han trazado mapas de los asentamientos potenciales máximos de construcciones de una a tres plantas, en el caso de que el suelo se sature. Para la realización de los cálculos de este trabajo, se han considerado los primeros 12 metros de suelos, teniendo en cuenta que se trata de fundaciones directas.

La ciudad de Córdoba tiene 57.600 hectáreas. Si se descuenta el valle del río Suquía y su afluente, el arroyo La Cañada,

el área remanente está ocupado por suelos loessicos. Se los pueden encontrar en las planicies al Norte y al Sur del río (Zona Geomorfológica 4) con unas 33000 has y en una banda de Transición (Zona Geomorfológica 5) con otras 6.000 has.

Cuando se formulan mapas de predicción del comportamiento de los suelos loessicos de la ciudad se presentan numerosas incertidumbres. Esto se debe a la limitada cantidad de datos comparada con la superficie que ocupan los suelos loessicos. Por ello es necesario plantear cómo extrapolar los resultados de análisis en esos pocos sitios (menos del 2% de la superficie), a otros situados en zonas sin datos (alrededor del 98%). Asimismo, hay que considerar la manera más eficiente de actualizar las formulaciones existentes.

En la resolución del problema de escasez de datos, se pueden realizar distintos procedimientos, tales como las estimaciones geoestadísticas o por simulación estocástica del terreno. Es interesante señalar que esta disyuntiva ya ha sido estudiada en algunas geociencias, en problemas ambientales, en minería y en la edafología. (Brus et al 1997, Goovaerts 2000). Se puede añadir la opinión cualitativa de expertos para actualizar la información existente (Rocca et al 2010).

En este trabajo se presentan los resultados de distintos procedimientos para analizar y actualizar los mapas de predicción existentes. Los resultados se han contrastado con mediciones directas de otro conjunto de datos independientes, que no han participado de la prognosis.

TIPOLOGIA DE LOS SUELOS LOESSICOS

Los modelos más simplificados para estudiar la colapsabilidad de los distintos suelos loessicos presentes en Córdoba, han conducido a la clasificación en Tipos Geotécnicos, de acuerdo a las deformaciones que se producen cuando se induce el colapso

Como resultados de la misma, se distinguen varios Tipos Geotécnicos autocolapsables (TG As, TG Ai, TG D) y otros que son potencialmente colapsables (TG P, TG M, TG E). Las definiciones se encuentran resumidas en la Tabla 1.

Tabla 1. Asentamientos promedios por colapso (Rocca 2002)

TIPO GEOTECNICO	RC	Profundidad	1 Planta %	2 Plantas %	3 Plantas %
Autocolapso superior (TG As)	< 1	0 a 3 metros	7,08	8,96	10,67
Autocolapso inferior (TG Ai)	< 1	3 a 10 metros	4,63	4,85	5,09
Daño Potencial (TG P)	1 a 2	0 a 3 metros	2,66	4,23	5,93
Daño Marginal (TG M)	1 a 2	3 a 10 metros	1,12	1,12	1,12
Libre de Daños (TG L)	> 2		0,00	0,00	0,00
Autocolapso Profundo (TG D)	< 1	Mayor a 10 m.	4,56	4,56	4,56
Marginal Profundo (TG E)	1 a 2	Mayor a 10 m.	0,00	0,00	0,00
Inexistencia de daño (TG I)			0,00	0,00	0,00

RC: Relación de Colapsabilidad

Profundidad: entorno de validez del TG

1 Planta: construcción con zapatas cargadas con 7 T/m²

2 Plantas: construcción con zapatas cargadas con 12 T/m²

3 Plantas: construcción con zapatas cargadas con 18 T/m²

Los valores más probables de la Relación de Colapsibilidad, en los suelos de Córdoba, se extrajeron de la Base de Datos Geotécnica de la U.N.Córdoba, empleando los resultados de 830 ensayos de compresión confinada, tabulados de acuerdo con la profundidad.

Para analizar las variaciones sectoriales, se dividió a la ciudad en tres grandes zonas: al N del río Suquía, al SW del río Suquía y al SE del río Suquía. Estas dos últimas están separadas por el Arroyo La Cañada. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 2. Relación de colapsibilidad en la ciudad de Córdoba

TIPOS GEOTECNICOS AUTOCOLAPSABLES						
	#	TG As P _f /P _o	#	TG Ai P _f /P _o	#	TG D P _f /P _o
ZONA NORTE (DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	16	0,71	31	0,67	2	0,45
COV		0,25		0,27		0,13
ZONA OESTE (SW DEL SUQUIA)						
PROMEDIO	41	0,74	41	0,56	38	0,56
COV		0,28		0,36		0,36
ZONA ESTE (SE DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	57	0,71	138	0,61	45	0,64
COV		0,25		0,39		0,44
TOTAL DE ENSAYOS	114		236		85	
PROMEDIOS GENERALES		0,72		0,60		0,60
TIPOS GEOTECNICOS POTENCIALMENTE COLAPSABLES						
	#	TG P P _f /P _o	#	TG M P _f /P _o	#	TG E P _f /P _o
ZONA NORTE (DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	26	1,57	34	1,45	5	1,70
COV		0,27		0,21		0,12
ZONA OESTE (SW DEL SUQUIA)						
PROMEDIO	52	1,50	49	1,37	28	1,46
COV		0,18		0,18		0,21
ZONA ESTE (SE DEL RIO SUQUIA)						
PROMEDIO	72	1,46	85	1,39	43	1,39
COV		0,19		0,20		0,20
TOTAL DE ENSAYOS	150		168		71	
PROMEDIOS GENERALES		1,49		1,40		1,44

#: número de ensayos

TG: Tipo Geotécnico (ver definiciones en Tabla I)

TIPOS DE ANÁLISIS REALIZADOS

La Geoestadística es una disciplina que estudia fenómenos que fluctúan en el espacio y sus métodos estadísticos son empleados por varias geociencias. Se la puede definir como la aplicación de la teoría de funciones aleatorias a la descripción de la distribución espacial de propiedades de materiales geológicos (Auvinet et al 2001).

A fines de la década de 1960 fue establecida para mapear la distribución espacial de uno o más atributos. Las aplicaciones más recientes han migrado hacia la simulación condicional también llamada imagen estocástica. Permite dibujar realizaciones igualmente probables, alternativas, de la distribución espacial del atributo estudiado (Deutsch et al 1998).

Estimaciones

La forma más empleada del análisis geoespacial es la interpolación, donde los datos puntuales son transformados en mapas continuos estimando los valores en los lugares no muestreados. Estos valores son sólo predicciones y existe incertidumbre sobre el valor exacto. Algunos métodos como en las estimaciones geoestadística se pueden cuantificar la incertidumbre implícita. Los valores no muestreados son una función de la estructura de correlación que describe la variabilidad espacial.

La estimación espacial de datos se realiza en función del conocimiento que existe entre los valores de una variable (en este caso, asentamientos) situados a una distancia determinada *h* (lag). La relación entre los valores de dos puntos en función de la distancia, se expresa a través de correlogramas, covariancia o variogramas (Auvinet et al, 2001, Deutsch et al 1998, Davis 1986, Isaaks et al 1989).

Una de las ventajas de la Geoestadística, sobre otras formas de interpolación, es que toma como base el kriging (kriging) que es un estimador lineal no sesgado (BLUE: best linear unbiased estimator). Esto se debe a que está basado en la minimización de la variancia. Existen varios tipos de kriging, siendo los más empleados el ordinario (OK) y el de indicadores (IK).

Asimismo, es posible obtener, además de los valores de las estimaciones, los correspondientes a la desviación estándar de la estimación, la que se suele tomar como la matriz de errores. Esto es la principal ventaja teórica sobre otros métodos de interpolación más sencillos como el de la distancia inversa.

Los métodos geoestadísticos proveen este estimador formal de la confiabilidad de los datos interpolados permitiendo que se destaquen las áreas de incertidumbre estadística. Cualquier error estándar que sea mayor que la desviación estándar de la muestra denota una predicción no confiable (Isaaks et al).

Existen variados ejemplos de aplicación en ingeniería geotécnica (Giles, 1994, Auvinet et al 2003, Parsons et al 2002, Christian, 2003, Baecher et al 2003) y en particular a suelos colapsables (Ali et al 1989).

Simulación Estocástica

La simulación estocástica trata básicamente de generar un juego de representaciones equi-probables (denominada realizaciones) de la distribución espacial de valores de atributos (en este caso asentamientos) y usar las diferencias entre los mapas simulados como una medida de la incertidumbre.

La simulación estocástica no tiene como objetivo minimizar la variancia del error local, sino que se enfoca en la reproducción de estadística tal como el histograma de muestreo (Brus et al 1997, Goovaerts 2000).

Hay realizaciones que están condicionadas a los valores de los datos. La simulación condicional fue inicialmente desarrollada para corregir el efecto de la suavización mostrado en los mapas producidos por los algoritmos del kriging. De hecho, las estimaciones por kriging son promedios móviles ponderados de los valores de los datos originales, por lo que ellos tienen menor variabilidad espacial que los datos originales (Figura 2).

El principio de simulación secuencial es una generalización en el que el condicionamiento se extiende para incluir todos los datos disponibles dentro de un vecindario, incluyendo los datos originales y todos los valores previamente simulados. Entre los métodos más empleados están la Simulación Secuencial Gaussiana (SGS) y la Simulación Secuencial de Indicadores (SIS) (Deutsch et al 1998).

Participación de expertos

La Geoestadística también permite el empleo de información cualitativa (soft) combinándola con datos reales numéricos (hard). Existen antecedentes que provienen de otras disciplinas tales como la Hidrología y la Edafología.

Deutsch and Journel (1998) han expresado que la principal ventaja de la aproximación por IK para generar una distribución condicionada acumulada CCDF a-posteriori es la habilidad para tener en cuenta datos cualitativos.

El modelo CCDF puede ser visto como un cokriging de indicadores donde la información se nutre de diferentes tipos: la información de indicadores hard y las probabilidades a-priori soft.

Si se los puede incorporar en los valores de probabilidad local a-priori, IK puede ser usado para integrar esa información dentro de los valores de la probabilidad a-posteriori. El proceso de IK consiste en una actualización de tipo bayesiana de la CCDF local a-priori en una CCDF a-posteriori usando la información suministrada por la CCDF local a-priori del vecindario.

El nombre del modelo Markov-Bayes (MB) para la CCDF relaciona a la aproximación constitutiva de Markov con el proceso bayesiano de adaptación a datos de la función a-priori.

La implementación MB para tener en cuenta datos de indicadores cualitativos se asimila a un cokriging de indicadores, donde las covariancias de datos de indicadores cualitativos y las covariancias cruzadas son calibradas desde el modelo de covariancia de indicadores hard. En todos los otros aspectos el algoritmo MB es similar a la simulación de indicadores secuenciales.

Este tipo de solución ha sido planteada en Geotecnia por Kinnicutt and Einstein (1996), en la creación de perfiles del terreno. Es un modelo iterativo en el cual se coloca inicialmente un perfil geológico usando datos objetivos existentes, y se va actualizando con el añadido o supresión de nuevos datos.

Bardossy et al (1998), han empleado la MB en una cuenca loessica de unos 6 km². Murray et al (2002) han usado esta técnica en el mapeo de contaminantes. Regli et al (2004) han indicado que la actualización en la simulación secuencial de indicadores es adecuada para la simulación de variables continuas o codificadas categóricamente.

Empleo de Tecnologías disponibles de fácil accesibilidad

La implementación de estos métodos requiere el empleo de un software geoestadístico específico. Recientemente, Goovaert (2009) ha realizado una comparación entre las ofertas disponibles. Algunos de estos programas tienen costos reducidos, incluso gratis, con los que se puede generar variogramas y realizar las interpolaciones por kriging y otros permiten también hacer simulación y actualización.

La principal fuente es la biblioteca Gslib (Geostatistical Software Library) que es un conjunto de programas desarrollados en D.O.S. por la Universidad de Stanford (Deutsch et al 1998). Los algoritmos se han incorporado a varios paquetes de programas más amigables.

En este trabajo se empleó el SADA (Spatial Analysis and Decision Assistance) V. 5 que es el producto de The Institute for Environmental Modeling (2008), un Consorcio liderado por la E.P.A. (U.S.A.) y varias universidades coordinadas por la U. Tennessee. Es un proyecto muy amplio y difundido, destinado a problemas esencialmente ambientales. Es de mencionar que el SADA combina a su accesibilidad (gratuidad) una muy buena prestación general para mapeos, tanto en 2D como en 3D. En la versión 5 ha incorporado a su menú la simulación. Además, ha simplificado mucho la instrumentación. Permite crear modelos pintándolos en el mapa. Pueden ser del tipo probabilístico cuando se expresa la probabilidad de que algo sea verdadero o falso. Esto podría ser la probabilidad de que un criterio de decisión pudiera ser excedido. Así, el rango de valores va desde 0 a 1.

Los modelos pueden ser suavizados con un algoritmo. La actualización se realiza por medio de un modelo MB. Como en todos los modelos geoestadísticos se requiere de un modelo de correlación para la actualización.

COMPARACIÓN DE MÉTODOS

Para el estudio, se introdujeron en el SADA v5, los datos de asentamiento un conjunto de perfiles de los distintos sectores de la ciudad. Con los distintas subrutinas, se realizaron cálculos para generar mapas en una cuadrícula de 120 x 120 pixels.

Para evaluar las diferencias entre los distintos métodos, se realizaron correlaciones entre ellos, mediante la comparación de los coeficientes de correlación entre los 14.400 puntos que están representados en cada uno de los mapas generados.

Estimaciones OK vs Distancia inversa

La correlación entre el OK y el método de Distancia inversa dio como resultado un CC = 0,982. Esto implica que el esfuerzo de usar estimaciones por OK no se refleja en mejoras sustanciales de resultado, frente a un método más sencillo como el de Distancia inversa.

Estimaciones por OK vs Simulaciones SGS con distinto número de realizaciones

La comparación visual entre ambos métodos, OK y SGS se presenta en la figura 2, donde se puede apreciar que a medida que aumenta el número de realizaciones, los gráficos de SGS se van aproximando al OK. El valor del coeficiente de correlación es de 0,94, cuando el número de realizaciones de SGS es 10, mientras que sube a 0,98 considerando SGS con 100 realizaciones.

Estimaciones IK vs Simulaciones SIS

La comparación entre IK y SIS presenta un CC de 0,86, lo que es inferior a los casos precedentes.

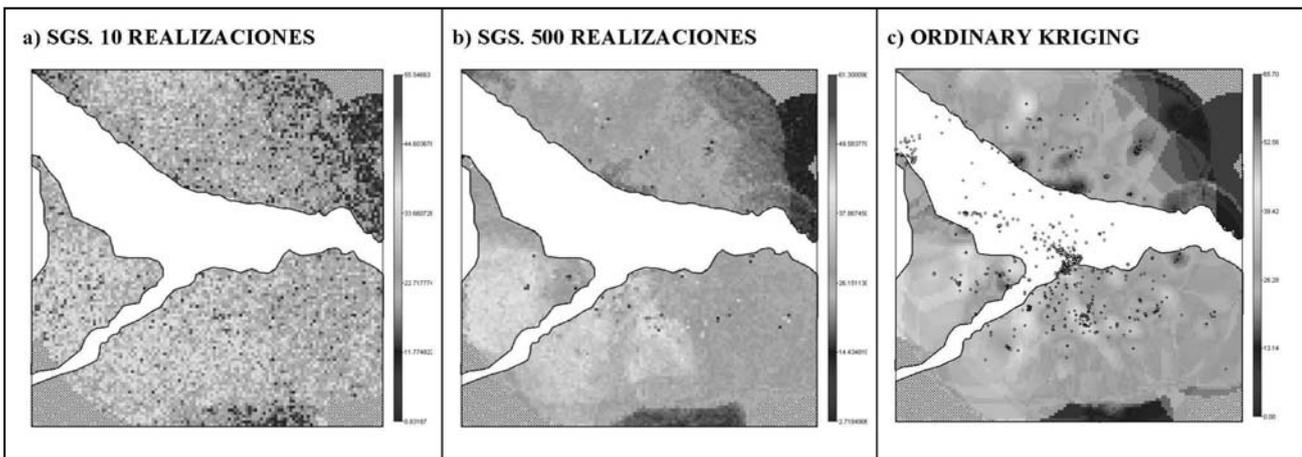
Cuando se comparan entre si, distintas simulaciones, el CC entre SIS 10r y SIS 100r es de 0,87

Actualizaciones de expertos con mapas de excedencia de distintos niveles

La participación de expertos requiere que formulen un mapa de tipo probabilístico, que luego es actualizado con datos reales. A los expertos se les solicitó que explicitaran gráficamente cuál es la probabilidad que cada zona de la ciudad tenga asentamientos de 15 y 35 cm. A modo de ejemplo, una de las respuestas formulando un mapa de experto y su actualización MB, se presenta en la figura 3. (Rocca et al 2010).

Para medir la influencia de los mapas de predicción formulados por expertos, se compararon las salidas de mapas generados a partir de considerar probabilidad de superar umbrales de 15 cm y de 35 cm.

Se analizaron los casos de umbrales probabilísticas correspondientes a 0, 15, 35 y 50 cm de asentamiento. La comparación entre los resultados de las actualizaciones considerando comenzar con un mapa a-priori de experto con umbral de 15 y con umbral de 35 cm, tiene un CC = 0,999. (Figura 4). Esto implicaría que no es relevante el umbral para la formulación del experto.



Figuras 2. Comparación visual entre a) y b) SGS y c) OK de las Zonas 4 norte y sur definidas en la figura 1. Las zonas vacías corresponden al valle del río Suquia y su afluente la Cañada y la región montañosa del oeste.

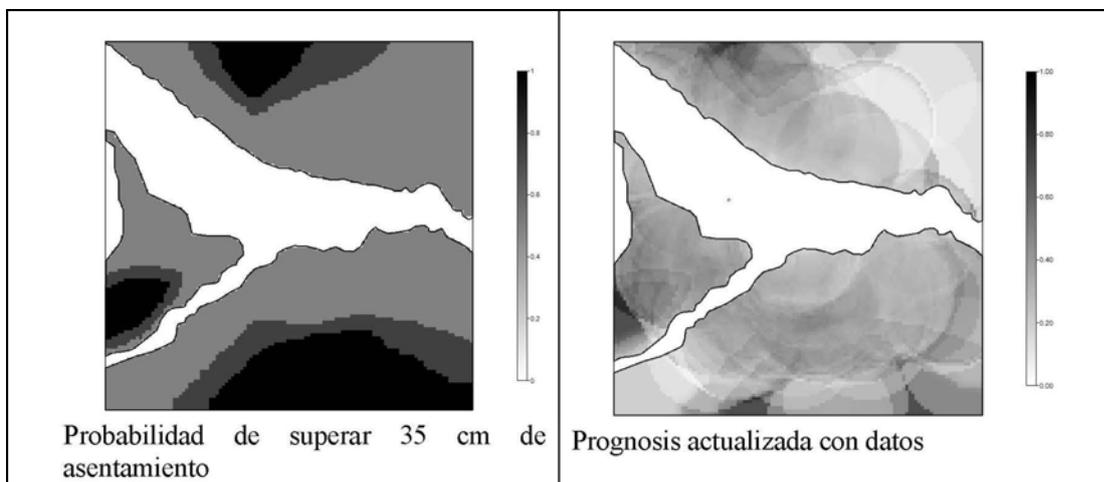


Figura 3. Actualización de un mapa realizado por un experto para las Zonas 4 norte y sur definidas en la figura 1. Escala de grises: negro=1, blanco=0

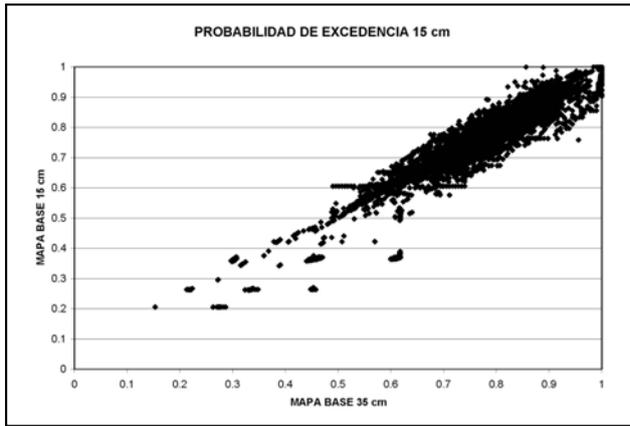


Figura 4. Correlación entre los resultados obtenidos con un mapa de experto con umbral de 15 y de 35 cm, en el cálculo de probabilidad de excedencia de 15 cm. en el mapa actualizado con datos numéricos.

VERIFICACIONES EN PUNTOS CONOCIDOS

Para validar los resultados obtenidos por los distintos métodos, se emplearon mediciones directas en localizaciones cuyos datos no participaron en los análisis. La figura 5 presenta los resultados en términos absolutos, comparando distintos métodos para tres puntos con asentamientos por colapso conocidos, desde baja a alta colapsabilidad.

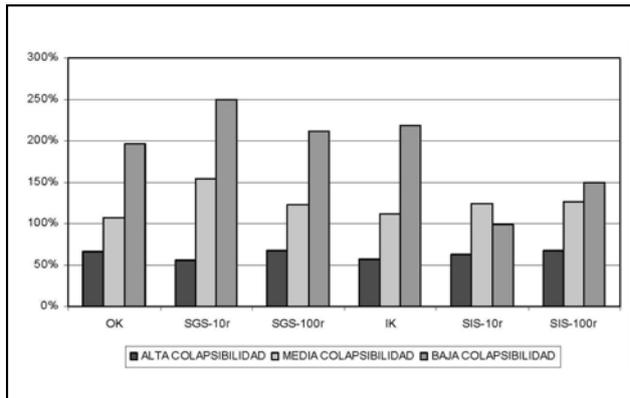


Figura 5. Relaciones entre las estimaciones/simulaciones y el valor de cálculo directo de puntos de control, expresado como porcentaje de éste (Rocca 2010).

Se puede apreciar que a medida que aumenta el número de realizaciones desde 10 a 100, los valores no se comportan uniformemente, tal como se puede presuponer desde el punto de vista teórico.

Esto llevó sumar más datos independientes y a analizar otros mapas de probabilidades abarcando una mayor gama de comportamiento, incorporando también las actualizaciones MB realizadas con mapas con participación cualitativa de expertos. En este último caso, los expertos responden sobre probabilidades de alcanzar un determinado umbral.

Para poder valorar los resultados, se puede considerar que en los lugares correspondientes a los puntos de control, la probabilidad de alcanzar los valores de asentamiento será de 1. La diferencia en alcanzar esa cifra, indica cuán alejado se está en la prognosis del método.

La figura 6 señala los resultados de las verificaciones realizadas para distintos métodos. Se calcularon probabilidades de excedencia de niveles de asentamiento para estimaciones por OK, SIS con cien realizaciones y la actualización de mapas formulados por expertos. En este caso, se partió de mapas de probabilidades de exceder 15 y 35 cm.

Cada punto de la figura 6 indica las probabilidades alcanzadas por cada método en particular. La probabilidad igual a 1 es la condición de verificación perfecta.

Se observa que hasta los 25 cm de asentamiento, aproximadamente, algunos valores pronostican razonablemente bien. En cambio para asentamientos altos, las probabilidades de las prognosis son relativamente bajas.

Los puntos correspondientes a la opinión de expertos usados en la actualización aparecen dentro de la tendencia general y no parecen diferenciarse significativamente en las prognosis.

Si se desagregan los resultados por zonas (Figura 7) se observa en general, una tendencia similar. Sin embargo, en los análisis realizados en la zona E, las diferencias entre los valores correspondientes a los asentamientos menores a 25 cm y los superiores a éstos, parecen más marcados.

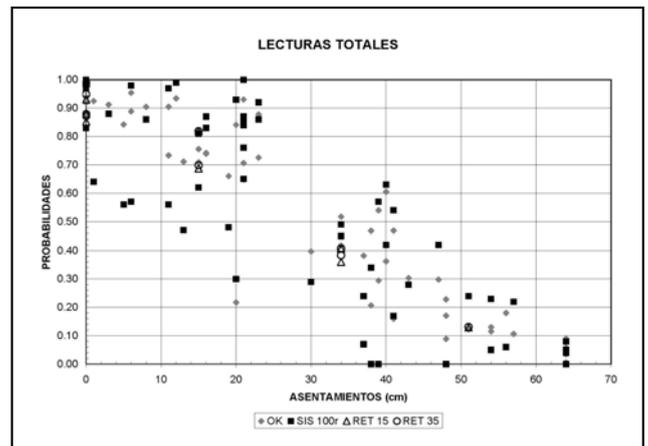


Figura 6. Comparación de probabilidades de los distintos métodos, estimaciones (OK), simulaciones (SIS) y actualización de formulaciones de expertos (RET 15, RET 35)

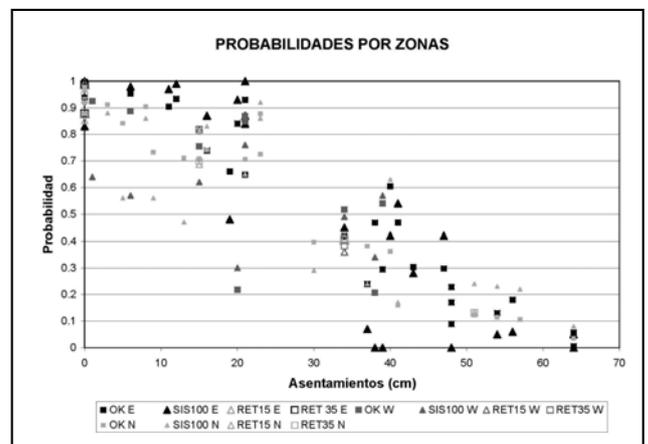


Figura 7. Desagregado de las probabilidades de los distintos métodos, de acuerdo a los distintos sectores de la ciudad.

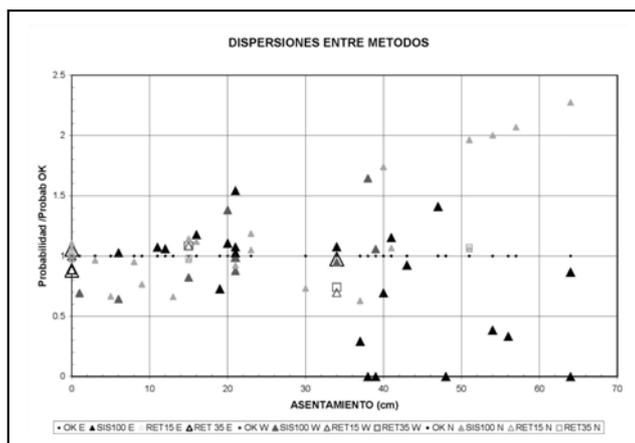


Figura 8. Relaciones entre distintos métodos, tomados relativo a la probabilidad computada por OK.

Para analizar los comportamientos relativos se calcularon relaciones entre las distintas prognosis. Se normalizó con relación a las probabilidades calculadas por OK y se los graficó en la figura 8.

En la figura 8 se observa que a medida que aumenta el asentamiento, existe mayor dispersión relativa entre los métodos empleados. Los valores correspondientes a expertos, se presentan con menor dispersión relativa que las simulaciones secuenciales.

Se nota, además, tendencias de tipo zonal, en este caso E (sudeste) y N (norte). Estas tendencias no son uniformes, y dependen del tipo de análisis que se realice. Lo más significativas se observan en la diferencia de sentido entre las zonas E y N, en correspondencia con el SIS.

Estas diferencias zonales no han sido aclaradas aún, y se especula sobre distintos fuentes que requieren estudios más profundos.

CONCLUSIONES

Los problemas de los suelos loessicos colapsables de la ciudad de Córdoba son conocidos desde hace varias décadas. Por ello se conoce bien que las zonas potenciales de generar daños están localizadas en las planicies al norte y sur del río Suquia. No obstante ello, todavía existen incertidumbre sobre detalles de ubicación que expliquen las diferencias de comportamiento de acuerdo con los espesores de los distintos tipos de loess y la susceptibilidad al colapso propia de ellos.

Debido que una considerable proporción de los loess requiere de la presencia de cargas exteriores para colapsar, existen cuantificadores como la Relación de Colapsabilidad y

procedimientos para su rápida determinación por medio de ensayos edométricos.

La visualización de la variabilidad espacial de los asentamientos de loess debido a la colapsabilidad, se puede apreciar a través de la representación de los asentamientos máximos que ocurrirían en construcciones fundadas en forma directa y extender por interpolación en el resto de la zona loessica.

Las herramientas informáticas disponibles más potentes han permitido realizar esta tarea empleando estimaciones geoestadísticas o mediante modelación estocástica.

En el análisis también se han considerado la actualización de la opinión cualitativa de expertos. La combinación con datos reales genera nuevos mapas cuyo análisis permite ponderar la influencia de estas opiniones.

Los cálculos se han realizado empleando SADA v. 5, que está integrado con un sistema de información geográfica. Este programa es el que brinda las mejores prestaciones en cuanto a costos y amigabilidad.

Se han producido mapas con los asentamientos esperables y sus variaciones areales por medio de Krigeado Ordinario (OK) y Krigeado de Indicadores (IK) y se han comparado con sus analogías estocásticas, la Simulación Gaussiana Secuencial (SGS) y la Simulación de Indicadores Secuenciales (SIS). A esto ha que sumar, la combinación de datos cualitativos de expertos.

El control realizado en puntos independientes no señala diferencias sustantivas entre los distintos métodos, en el sentido de que muestran igual tendencia. Hay diferencias en cuanto al mayor gasto computacional de las simulaciones estocásticas, por lo que se la debería reservar para problemas donde se deban reflejar los patrones de variabilidad local.

La experiencia global indica que los resultados de mapas de probabilidades de todos los métodos van perdiendo precisión a medida que va aumentando la magnitud del asentamiento por colapso.

Se observa que la opinión experta genera mejoramientos que tienen mayor influencia sobre las simulaciones estocásticas y relativamente poca sobre las estimaciones geoestadísticas. Esto se nota más cuando se analizan las dispersiones de los métodos en los distintos rangos de asentamiento por colapso.

Las variaciones zonales de los distintos sectores de la ciudad presentan particularidades que requieren un análisis más pormenorizado que el realizado hasta el momento.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con el apoyo de la Secretaria de Ciencia y Tecnología de la U.N.C. y de la Agencia Córdoba Ciencia (Gobierno de Córdoba).

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

ALI, M.M., E.A. NOWATZKI AND D.E. MYERS, 1989.
Geostatistical methods to predict collapsing soils.
Proc. XII Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng. Vol 1: 567-570.

AUVINET, G., M. JUAREZ AND Z. MEDINA, 2001.
Geostatistical interpretation of soil exploration.
Proc. XV Intl. Conf. Soil Mech. Geot. Engng. Istanbul. Vol 1: 373-376.

AUVINET G., AND M. JUAREZ, 2003.
Geostatistical Characterization of the Lacustrine subsoil of Mexico valley.
Proc. XII PanAm. Conf. Soil Mech. Geot. Engng. Boston. Vol 1: 61-66.

- BAECHER, G.B. AND J. CHRISTIAN, 2003.
Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering.
J. Wiley, 605 pp. Chichester. UK.
- BARDOSSY A, AND W. LEHMANN, 1998.
Spatial distribution of soil moisture in a small catchment.
Part 1: geostatistical analysis. J. of Hydrology, 206:1-15.
- BODENBENDER G., 1890.
La cuenca del valle del Río Primero en Córdoba.
Bol. Ac. Nac. Ciencias. Córdoba. Tomo XII: 5-54.
- BRUS, DJ AND J.J. DE GRUIJTER, 1997.
Random sampling or geostatistical modeling? Choosing between design-based and model-based sampling strategies for soil (with Discussion).
Geoderma 80: 1-44. Discussion: 45-59.
- CHRISTIAN, J.T., 2003.
Geotechnical Engineering Reliability: How well do we know what are doing?
ASCE J. Geot. Geoenv. Engng Vol 130: 985-1003.
- DAVIS, J.A., 1986.
Statistics and data analysis
in Geology. J. Wiley, 646 pp., New York.
- DEUSTCH, C.V. AND A.G. JOURNAL, 1998. GSLIB.
Geostatistical Software Library and User's Guide.
Oxford U. Press, 369 pp. London. U.K.
- GILES, D., 1994.
Geostatistical interpolation techniques for geotechnical data modeling and ground conditions risk and reliability assessment. B.
O. Skipp, ed. Risk and Reliability in ground engineering.: 202-214. Thomas Telford, London.
- GOOVAERTS, P., 2000.
Estimation or simulation of soil properties?
An optimization problem with conflicting criteria.
Geoderma 97:165-186.
- GOOVAERTS, P (2009)
Geostatistical software.
En Fisher and Getis eds. Handbook of Applied Spatial analysis.:129-138. Springer.
- INSTITUTE FOR ENVIRONMENTAL MODELING (2008)
SADA: Spatial Analysis and Decision Assistance.
V.5. University of Tennessee
- ISAAKS, E.H AND R.M. SRIVASTAVA, 1989.
An introduction to Applied Geostatistics.
Oxford U. Press, 561 pp. New York .
- KINNICUTT P.G. AND H.H. EINSTEIN, 1996.
Incorporating uncertainty, objective and subjective data in geologic site characterization.
Proc. Uncertainty in the Geologic environment ASCE GT Sp Conf. 58, Vol 1:104-118.
- LIN Z. AND W. LIANG, 1982.
Engineering properties and zoning of loess and loess-like in China.
Can. Geot. J. 19:76-91.
- MURRAY CJ, H.J. LEE AND M.A. HAMPTON, 2002.
Geostatistical mapping of effluent-affected sediment distribution on the Palos Verdes shelf.
Continental Shelf Research. 22:881-897.
- PARSONS, R.L. AND J.D. FROST, 2002.
Evaluating site investigation quality using GIS and Geostatistics.
J. Geot. Geoenv. Engng. Vol 128: 451-461.
- QUINTANA CRESPO, E., 1991.
Sistema de evaluación geotécnica del terreno en áreas urbanas.
Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas VI: 189-201.
- REGINATTO, A., 1970.
Propiedades mecánicas de algunos suelos de la ciudad de Córdoba.
Memorias 2 R.A.M.S.I.F. Vol. 1. Córdoba.

- REGLI C., ROSENTHALER L, AND P. HUGGENBERGER, 2004.
GEOSSAV: a simulation tool for subsurface applications.
Computer and Geosciences, Vol 30: 221-238.
- ROCCA, R. J., 2002.
Cálculo del asentamiento por colapso en suelos loessicos de Córdoba.
Proc. XVI Congr.Arg. Mec. Suelos e Ing. Geotec. Trelew.:36-47.
- ROCCA, R.J., 2004.
Variaciones areales de la colapsibilidad en la ciudad de Córdoba.
XVI Congreso Arg. Mec.Suelos e Ing.Geot. Vol 1. Córdoba.
- ROCCA, R. J., 2005
Método simplificado para el cálculo del asentamiento por colapso en suelos loessicos de Córdoba.
Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, tomo 57: 137-146.
- ROCCA R.J., 2006.
Confiabilidad de las estimaciones de colapsibilidad de la ciudad de Córdoba.
XVIII CAMSIG. Vol I.: San Juan
- Rocca R.J. 2010.
Limitaciones de estimaciones y simulaciones de la colapsibilidad en suelos loessicos de Córdoba.
Rev. Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. Vol.24: 63-72.
- ROCCA, R.J., E. QUINTANA CRESPO Y V. RINALDI, 1990.
Modelación geotécnica del subsuelo de la ciudad de Córdoba. As. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas V:121-130.
- ROCCA, R.J., E, QUINTANA CRESPO, M.G. GOIO Y E.G. ABRIL, 1996.
Fundamentos para la Microzonificación Sísmica de la ciudad de Córdoba.
Asoc. Arg. Geol. Apl. Ing. Actas X: 237-355.
- ROCCA, R.J. AND E. QUINTANA CRESPO, 1999.
Geotechnical zonation of Cordoba city (Argentina) using cluster analysis.
Proc. XI PanAm. Cong. Soil Mech.Geot.Eng. Vol II: 659-666. Foz Iguazu. Brasil.
- ROCCA, R.J., E. QUINTANA CRESPO, M.G. GOIO Y E.G. ABRIL, 1995.
Carta geotécnica de la ciudad de Córdoba.
As.Arg.Geol.Apl.Ing. Pub.Esp. 3: 322-340.
- ROCCA R.J. Y TERZARIOL R.E. (2010)
La ponderación de la experticia en la predicción de la colapsibilidad de los suelos de la ciudad de Córdoba.
XX CAMSIG. Mendoza. Vol.1: 129-136.



Caracterização geológica-geotécnica de solos argilosos do Vale do Ribeira para serem empregados como barreiras selantes

Caracterización geológica-geotécnica de suelos arcillosos del Valle del río Ribeira para ser usados como barreras impermeabilizantes

Rodriguez, Jaqueline Ruiz ¹ ✉ - Rodrigues, Valéria Guimarães Silvestre ¹

Recibido: 23 de Julio de 2012 • Aceptado: 20 de Mayo de 2013

Resumen

Los sistemas de barreras impermeabilizantes y cobertura son fundamentales en el encapsulamiento de residuos, desempeñando funciones tales como aislamiento y disminución de la infiltración en el caso de las coberturas, además de minimizar la migración de contaminantes. En este contexto, la caracterización geológica-geotécnica del suelo es importante para evaluar si podrá ser usado o no como uno de estos sistemas, además de proveer datos de sus propiedades, lo que facilita la comprensión de las posibles interacciones entre el suelo y el contaminante. El objetivo de este trabajo fue caracterizar suelos arcillosos de la región del Valle del río Ribeira (Brasil). En estos suelos se realizaron ensayos de granulometría, análisis térmico, capacidad de intercambio catiónico (CIC), superficie específica (SE), conductividad hidráulica, contenido de materia orgánica y límites de Atterberg. Los ensayos granulométricos indican que los suelos analizados son materiales finos, arcilla-limo. Los ensayos de CIC, SE y los análisis térmicos, pusieron de manifiesto que la arcilla predominate es la caolinita. Los ensayos de límites de Atterberg dieron índices de plasticidad están entre 29,94 y 33,55 %, valores característicos de arcillas altamente plásticas. Todos los suelos muestran baja conductividad hidráulica (10^{-8} a 10^{-9} m / s), la que se considera adecuada para el uso en revestimientos. Se concluye que estos suelos presentan características similares, con relación a los aspectos geológicos-geotécnicos y pueden ser considerados adecuados para su empleo como barreras impermeabilizantes y coberturas.

Palabras claves: Barreras impermeabilizantes; Suelos arcillosos, Valle del río Ribeira.

Resumo

Sistemas de barreiras selantes e de cobertura são fundamentais no encapsulamento de resíduos, desempenhando funções como

1. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo
- São Carlos - Brasil

✉ jaqueruiz@sc.usp.br; valguima@sc.usp.br

isolamento e diminuição da infiltração no caso das coberturas, além da minimização da migração de contaminantes. Neste contexto, a caracterização geológico-geotécnica do solo é importante para avaliar se ele poderá ser empregado ou não como um destes sistemas, além de fornecer dados de suas propriedades, facilitando o entendimento das interações que poderão existir entre o solo e o contaminante. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi caracterizar solos argilosos da região do Vale do Ribeira (Brasil). Nestes solos foram realizados ensaios de granulometria conjunta, análise térmica diferencial, capacidade de troca catiônica (CTC), superfície específica (SE), condutividade hidráulica, teor de matéria orgânica e limites de consistência. Os ensaios granulométricos indicaram que os solos analisados são materiais finos, argila-silte. Nos ensaios de CTC, SE e nas análises térmicas, notou-se que o argilomineral predominante é a caulinita. Nos ensaios de limites de consistência, os índices de plasticidade estão entre 29,94 e 33,55 %, valores característicos de argilas altamente plásticas. Todos os solos exibiram baixa condutividade hidráulica (10^{-8} a 10^{-9} m/s), o que é considerado adequado para uso em barreiras selantes. Desta forma, conclui-se que estes solos apresentam características semelhantes com relação aos aspectos geológico-geotécnicos, e são considerados adequados para ser empregado como barreiras selantes.

Palavras chave: Barreiras selantes, Solos argilosos, Vale do Ribeira.

Abstract

Liners and covers systems are essential in the encapsulation of waste, performing functions such as isolation and infiltration reduction (for covers), and minimizing contaminant migration. In this context, geological-geotechnical soil characterization is important to evaluate if it may or not be used in one of these systems, also provides their data properties, making the understanding of the possible interactions between soil and contaminant easier. The purpose of this work was the characterizations of clay soils present in Ribeira Valley (Brazil). Texture, thermic, cation exchange capacity (CEC), surface area, hydraulic conductivity, organic matter content and consistency limit analyses were conducted. The texture analysis showed that the analyzed soils are fine, clay-silt. The thermic, cation exchange capacity, surface area analysis provided that kaolinite is the prevailing clay mineral. The consistency limit analysis showed plasticity indexes between 29,94 and 33,55 %, values characteristic of highly plastic clays. All soils presented low hydraulic conductivity (10^{-8} to 10^{-9} m/s), that is considered proper to be used in liners. This way, it may be deduced that these soils have similar characteristics concerning geological-geotechnical aspects and may be considered adequate to be used in liners.

Keywords: Liners; Clay soils; Ribeira Valley.

INTRODUÇÃO

A contaminação do meio ambiente produzida pela disposição inadequada de resíduos vem sendo motivo de preocupação mundial. A caracterização e o desenvolvimento de técnicas para minimizar e prevenir esta contaminação tem gerado diversos estudos no âmbito científico e/ou tecnológico. Neste contexto, a caracterização de solos argilosos para serem empregados na construção de barreiras impermeabilizantes (barreiras selantes ou liners) é extremamente importante, tanto com relação à minimização da contaminação como por ser uma solução de baixo custo.

A barreira selante é caracterizada por uma camada de baixa permeabilidade, construída de material natural (solos argilosos), artificial (geossintéticos ou geomembranas) ou pela combinação de ambos. Essas barreiras, segundo Folkes (1992) são empregadas em diversas obras de engenharia, tais como: aterros sanitários e industriais, lagoas de decantação, canais de reservatórios, diques, lagoas de tratamento de resíduos, entre outros.

Os materiais naturais a serem empregados como barreiras devem atender às várias exigências impostas para cada tipo de obra e, obviamente para diminuir os custos, tem sido dada preferência à utilização de materiais disponíveis no próprio local da obra ou em suas proximidades. Desta forma para se construir uma barreira natural, algumas especificações com respeito

ao solo devem ser respeitadas. Em geral, a condutividade hidráulica deve ser igual ou inferior a 10^{-7} cm/s, o índice de plasticidade deve ser igual ou superior a 7 ou 10%, o tamanho máximo das partículas deve variar de 25 a 50 mm, finos devem estar presentes em 20 a 30% e o máximo de areia grossa permitido é de 30% (Daniel, 1993). Já de acordo com Rowe et al. (1995), os materiais naturais empregados na construção de barreiras selantes devem seguir os seguintes critérios: a) condutividade hidráulica máxima de 10^{-7} cm/s; b) não deve apresentar fraturas naturais ou oriundas da compactação; c) deve ter uma quantidade mínima de 15 a 20% de partículas menores que $2\mu\text{m}$ e um índice de plasticidade maior que 7%; d) deve ser compatível com o resíduo descartado, não sofrendo aumentos significativos da condutividade hidráulica; e) a espessura mínima recomendada de uma camada argilosa compactada para disposição de resíduos domésticos está entre 90 a 100 cm e f) na disposição de resíduos tóxico-industriais a espessura mínima indicada é de 3 a 4m.

Diversos fatores afetam o bom desempenho de uma barreira selante argilosa. Christensen et al. (1994) relatam que os aspectos que mais influenciam a qualidade das barreiras selantes são condutividade hidráulica, grau de compactação, umidade, composição da argila, técnica de execução e espessura da barreira. Desta forma, a caracterização do solo é de fundamental importância para determinar se o mesmo é adequado ou não para ser utilizado como barreira selante.

A condutividade hidráulica é o parâmetro mais importante na determinação do solo argiloso como barreira selante. Segundo *Christensen et al. (1994)*, a maioria das documentações a respeito de obras com barreiras selantes argilosas reporta valores de condutividade hidráulica máximos de 10^{-7} cm/s. A compactação auxilia na diminuição da condutividade hidráulica. A eficiência da compactação, segundo *Sharma e Lewis (1994)*, depende de quatro fatores principais: distribuição de tamanho dos poros, mineralogia da argila, umidade de compactação e método de compactação. *Daniel (1993)* acrescenta que para a barreira selante funcionar de maneira efetiva é preciso que seja contínua e livre de imperfeições hidráulicas como fraturas, juntas e furos. O objetivo da compactação de barreiras argilosas é remover torrões de argila e transformá-las em uma massa homogênea de solo, livre de vazios grandes e contínuos, e tornar o solo mais denso (*Daniel, 1993; Sharma e Lewis, 1994*). Para atingir a condutividade hidráulica desejada, o solo deve ser úmido o suficiente para que, com a compactação, os torrões de argila se unam, eliminando os poros que havia entre eles (*Daniel, 1993*).

A argila é um material natural, de granulação fina, que geralmente, ao ser umedecido, adquire certa plasticidade (*Santos, 1989; Yong et al., 1992; Sharma e Lewis, 1994; Rowe et al., 1995*). As argilas possuem três características principais quanto à utilização na construção de barreiras selantes: adsorção, capacidade de troca iônica e baixa permeabilidade. *Velde (1992)* explica que essas características se devem ao tamanho diminuído das partículas de argila e a sua estrutura.

Além das barreiras selantes, também são empregados sistemas de cobertura (geralmente, constituídos com o mesmo material argiloso empregado na impermeabilização da base do depósito de resíduos), que servem para minimizar a infiltração de água em resíduos enterrados. Os objetivos de um sistema de cobertura podem variar de lugar para lugar, mas geralmente incluem: a) controle de erosão; b) a estabilização química na formação de drenagem ácida nos resíduos de mineração (através de um controle de entrada de oxigênio); c) o controle de liberação de contaminante (através do controle da infiltração) e d) o fornecimento de um meio de crescimento para o estabelecimento de uma vegetação sustentável.

O emprego de solos tropicais em aplicações geoambientais (barreiras selantes e sistemas de cobertura no encapsulamento de resíduos) ainda é restrito, uma vez que a prática corrente deriva bastante da experiência de países da América do Norte e da União Européia, onde predominam solos formados em climas frios e temperados. A perspectiva do emprego de solos tropicais em sistemas de barreiras selantes aumenta consideravelmente as possibilidades de países de clima tropical em proteger seus recursos naturais, pelo menos até que novas soluções técnicas sejam dadas ao problema da disposição de resíduo (*Leite, 2001*).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi o de avaliar a viabilidade geológica-geotécnica de solos tropicais (argilosos), coletados na região do Vale do Ribeira (São Paulo - Brasil), para serem empregados como barreiras selantes na deposição de resíduos (sólidos e de mineração). A região do Vale do Ribeira apresenta, ainda hoje, problemas decorrentes da deposição inadequada de resíduos sólidos e de mineração, necessitando desta forma de soluções que viabilizem a disposição correta de tais resíduos (com impermeabilização da base), e que sejam de baixo custo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os solos argilosos foram coletados na região do Vale do Ribeira (Brasil), no município de Eldorado Paulista, Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas, em outubro de 2011, em três pontos (solo 1, solo 2 e solo 3), sendo a distância entre os pontos de 100 m (aproximadamente). Os três solos foram amostrados na estrada que liga os municípios de Eldorado Paulista e Sete Barras.

As amostras deformadas foram coletadas a partir do emprego de uma pá. Em cada ponto de amostragem foram coletados 15 kg de solo, aproximadamente. No laboratório, as amostras foram destorroadas, submetidas à secagem à sombra por aproximadamente duas semanas, quarteadas e homogêneas.

As amostras empregadas no ensaio de condutividade hidráulica foram coletadas a partir de tubo de PVC (amostra indeformada). Esse material foi envolvido com papel filme, sendo armazenado em caixa de madeira com serragem. No laboratório, essas amostras foram armazenadas em câmara úmida até a realização dos ensaios.

Para caracterização do solo foram realizadas as seguintes análises: a) granulométrica; b) capacidade de troca catiônica (CTC) e superfície específica (SE); c) análise térmica diferencial (ATD); d) limites de consistência (limite de liquidez e limite de plasticidade), e) difratometria de raios X (DRX), f) condutividade hidráulica e g) matéria orgânica.

Análise Granulométrica

Para que seja possível compreender a estrutura e textura dos solos analisados é fundamental medir a dimensão das partículas constituintes dos mesmos. Assim, segundo *Bueno e Vilar (1984)* essa aferição é feita por meio das curvas de distribuição granulométrica. Para tanto, foram realizados ensaios de análise granulométrica conjunta, compreendendo duas etapas, peneiramento e sedimentação. As práticas seguiram as recomendações da norma da *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) – MB 32 (NBR7181)*.

Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Superfície Específica (SE)

A capacidade de troca catiônica, basicamente, evidencia a aptidão do solo em reter e trocar íons carregados positivamente na superfície coloidal. Logo, é fundamental na caracterização de solos, pois consiste em ser uma propriedade que distingue cada argilomineral. Segundo *Grim (1953)*, observa-se que a origem dessa propriedade compreende: 1) deficiência de carga por quebra nas bordas da folha do mineral; 2) substituição de alguns cátions tetravalentes por trivalentes, ou trivalente por divalente; 3) exposição a troca dos cátions OH da folha octaédrica por H na região da borda da folha do mineral.

As causas 1 e 3 são responsáveis pela CTC do grupo Caulinita. No caso das Esmectitas e Vermiculitas 80% da sua CTC têm origem na causa 2. Os outros argilominerais (Illita e Clorita) tem composição semelhante as 3 causas na origem de sua CTC (*Grim, 1953*).

Já o estudo da superfície específica da fração fina é fundamental para a compreensão da retenção de contaminantes, pois, segundo *Leite (2001)*, partículas de maior “área exposta” desenvolvem mais cargas em sua superfície, e, conseqüentemente

retêm mais os compostos existentes na solução. Dessa forma, quanto menor a partícula de solo, maior será sua capacidade de adsorção e, por conseguinte, maior será sua capacidade de retenção de elementos traço poluentes.

Ambas as propriedades foram determinadas através do método de adsorção de azul de metileno descrito em *Pejon (1992)* em que este corante catiônico orgânico (cloridato de metilamina) substituiu com facilidade os cátions já adsorvidos no solo. A quantidade suficiente para ocupar todos os sítios de adsorção mede diretamente a CTC e SE (*Leite, 2001*).

Para este ensaio foi utilizada 0,5 grama de solo (passante na peneira 200 #) para cada amostra investigada, um pouco de água destilada e aos poucos foi adicionada (titulada) solução de azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3S^+$) com concentração de 1,5 g/L. Este procedimento foi realizado com agitação constante, através de um agitador magnético, adicionando-se um pouco de solução de azul de metileno e deixando-se a argila reagir por 3 minutos. Em seguida com bastão de vidro foi retirada uma gota da suspensão, sendo esta colocada sobre papel filtro Whatman 42. Este procedimento foi repetido até o ensaio apresentar resultado positivo.

Análise Térmica Diferencial (ATD)

A análise térmica diferencial (ATD) determina energia que varia entre a amostra e o material de referência quando estes são submetidos, lado a lado, ao aumento controlado da temperatura. Quando a amostra sofre uma transformação, esta variação energética é observada através da diferença entre os picos de reações endo e exotérmica. Segundo *Tan et al. (1986)*, amostras compostas por solo na fração argila permite-nos obter resultados satisfatórios para que sejam feitas interpretações quantitativas e qualitativas. É possível, através da comparação entre as curvas obtidas em função da variação de temperatura na ATD e os padrões conhecidos, determinar os argilominerais presentes no solo.

Para a determinação em ATD utilizou-se aproximadamente 1 g de amostra. Este material foi macerado e peneirado (peneira 200 #). Os ensaios foram realizados em condições atmosféricas, com aquecimento de 0 a 1000 °C, e velocidade de aquecimento de 10 °C por minuto no alto forno BP Engenharia.

Limites de Atterberg ou Limites de Consistência

Utiliza-se o estudo da consistência dos solos argilosos para poder determinar os estados possíveis em que podem ser encontrados. Os limites são de Liquidez (LL), de Plasticidade (LP) e de Contração (LC). Neste trabalho, foram realizados os ensaios apenas para a obtenção dos dois primeiros parâmetros, já que o maior interesse desta pesquisa localiza-se na compreensão dos estados líquido – plástico – semi-sólido. A realização dos ensaios seguiu as normatizações da *ABNT: MB-30 (NBR6459)* e *MB-31 (NBR9180)*, sendo que para a determinação do LL foi utilizado o método com o aparelho de Casagrande. A partir dos resultados de LL e LP foi possível obter o índice de plasticidade (IP), para cada solo analisado. Também foi possível determinar o índice de atividade de Skempton (calculado a partir do IP e da fração argilosa).

Difratometria de Raios-X (DRX)

A difratometria de raios-X possibilita a análise de cada sistema de “organização” dos argilominerais, o que permite

classificá-los, ao identificar as amostras, entre os grupos 1:1 (Caulinitas) e 2:1 (Esmectitas).

Este ensaio foi realizado conforme procedimentos adotados em *Grim (1953)*, onde as amostras foram peneiradas e foram preparadas lâminas com o material que passou nas peneiras de 200 # e 400 #. Para cada ponto foram preparadas lâminas naturais, com etileno-glicol e aquecidas à 550° C em mufla. Estas lâminas foram analisadas em Difratômetro de Raios X Rigaku Ultima IV, modelo Ultima IV.

Condutividade Hidráulica

Este parâmetro é um dos mais importantes na escolha de um solo para ser utilizado na construção de uma barreira selante (indica a facilidade ou não da percolação de um líquido no solo). A condutividade hidráulica foi determinada conforme procedimento descrito na norma NBR 13292. Este ensaio foi realizado com amostra indeformada coletada em tubo de PVC.

Matéria Orgânica

Este parâmetro é importante, pois ele é um indicativo da interação do contaminante com o solo, pois a matéria orgânica influencia na adsorção de tais substâncias.

A determinação de matéria orgânica foi realizada conforme procedimentos descritos em *Eusterhues et al. (2005)*. Neste ensaio, foram empregados 2 g de solo e 20 mL de H₂O₂ 30 % (v/v), em duplicata, sob aquecimento de 40 a 60° C, até ocorrer digestão total da matéria orgânica presente nos diferentes solos analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras de solo coletadas em Eldorado Paulista apresentaram granulometria fina, ocorrendo predomínio das frações argila e silte (Figura 1). Dos três solos analisados, o solo 1 foi considerado mais fino, pois apresenta maior teor de argila (68,72 %) e de silte (24,38 %), de acordo com a Figura 1.

A granulometria é uma propriedade de grande importância na escolha do solo para ser utilizado como barreira selante. Segundo *Rowe et al. (1995)*, o solo que será empregado na construção de uma barreira selante deve apresentar no mínimo 15 a 20 % da fração argila. Assim sendo, os três solos analisados satisfazem esta condição, pois apresentaram teores de argila variando de 56,80 a 68,72 % (Figura 1).

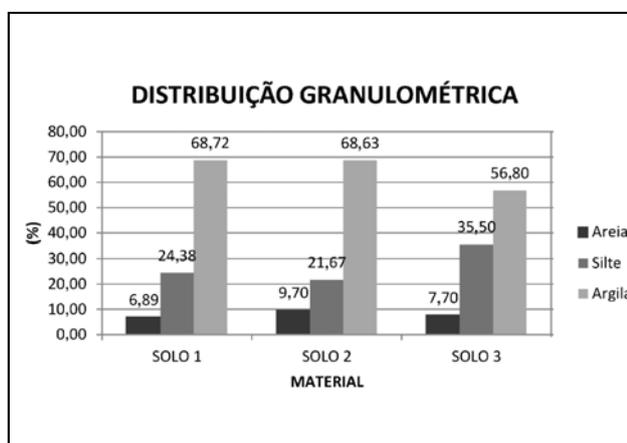


Figura 1. Distribuição granulométrica (Solo 1, Solo 2 e Solo 3)

Os valores de condutividade hidráulica obtidos para os três solos variaram de 10^{-8} a 10^{-9} m/s. De acordo com *Rowe et al. (1995)*, as barreiras argilosas naturais e compactadas devem apresentar uma condutividade hidráulica igual ou menor que 10^{-9} m/s. Desta forma, os solos investigados satisfazem este outro critério para o emprego desse material na construção de barreira selante natural. Esses valores de condutividade hidráulica, de acordo com *Pinto (2000)*, são indicativos de solos impermeáveis. Ainda segundo esse autor, os valores de condutividade obtidos nas três amostras são típicos de solos argilosos, o que foi comprovado pelas análises granulométricas.

Quanto ao índice de plasticidade, as amostras apresentaram valores elevados, entre 29,94 e 33,55 % (Tabela 1). De acordo com *Roque (2004)*, os solos argilosos para serem empregados como barreira selante devem apresentar índices de plasticidade superiores a 7%. No caso dos solos coletados no Vale do Ribeira, todas as amostras apresentaram índice de plasticidade superior a 29,94 % (IP variou de 29,94 a 33,55 %). O solo 3 apresentou o maior índice de plasticidade (33,55 %) e o solo 2 o menor (29,94 %), conforme Tabela 1.

De acordo com a Tabela 1, o maior valor de LL foi obtido para o solo 1, mesmo material que apresentou maior teor da fração argila. O solo 3, novamente foi considerado o menos adequado dos três, pois apresentou os menores valores de LL e LP (Tabela 1). Quanto ao LP, o solo 2 foi o que apresentou valor mais elevado (53,06 %), conforme Tabela 1.

Tabela 1. Limites de consistência (LP e LL), índice de plasticidade e índice de atividade de Skempton (Solo 1, Solo 2 e Solo 3).

Amostra	LP (%)	LL (%)	IP (%)	As*
Solo 1	50,48	84,00	33,52	0,50
Solo 2	53,06	83,00	29,94	0,47
Solo 3	48,45	82,00	33,55	0,61

As* - índice de atividade de Skempton

A partir dos resultados de IP e do teor de fração argila foi possível determinar o índice de atividade de Skempton (Tabela 1). Tal índice indica a influência das propriedades mineralógicas e química-coloidal da fração argila nas características geotécnicas dos solos argilosos. Os três solos apresentaram índice de atividade abaixo de 0,75, indicando que esses solos são inativos (essa atividade está ligada a reatividade, contração e expansão). Tais resultados confirmam a viabilidade destes três solos para serem empregados como barreiras selantes, uma vez que os mesmos são considerados inativos.

As análises realizadas por DRX indicaram a presença de caulinita, illita, quartzo e muscovita nos solos argilosos coletados no Vale do Ribeira. As Figuras 2, 3 e 4 exibem os difratogramas de cada solo (amostra normal, amostra aquecida e amostra tratada com etileno-glicol).

A partir dos resultados obtidos em DRX, nota-se que nas três amostras não foi detectada a presença de argilominerais expansivos, pois os difratogramas correspondentes às amostras normais e os obtidos com tratamento de etileno-glicol são iguais, não ocorrendo elevação dos picos (Figuras 2, 3 e 4).

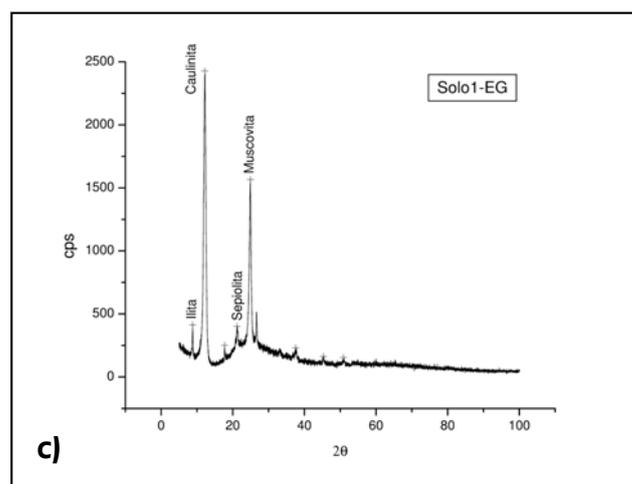
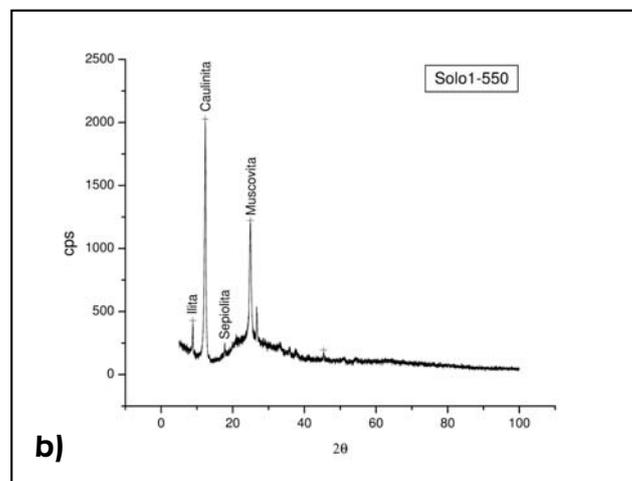
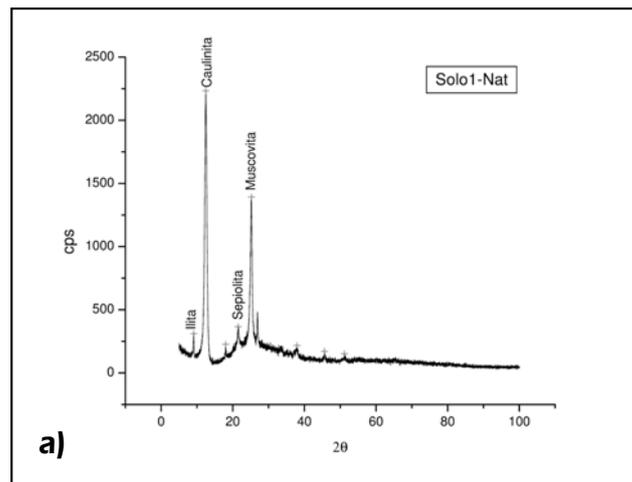


Figura 2. Difratogramas obtidos para o Solo 1, a) Amostra Normal, b) Amostra aquecida, c) Amostra tratada com etileno-glicol.

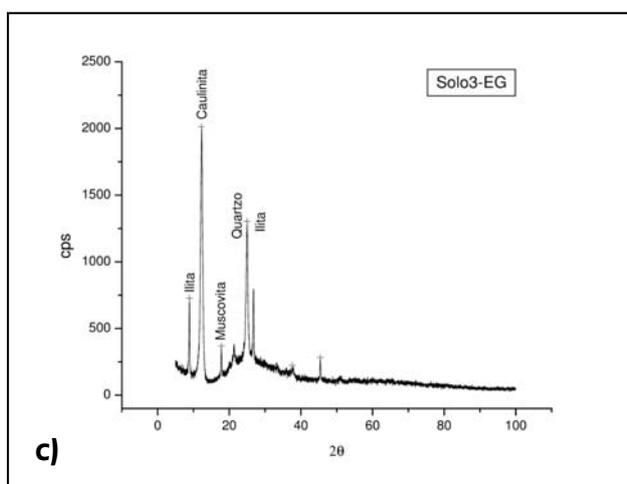
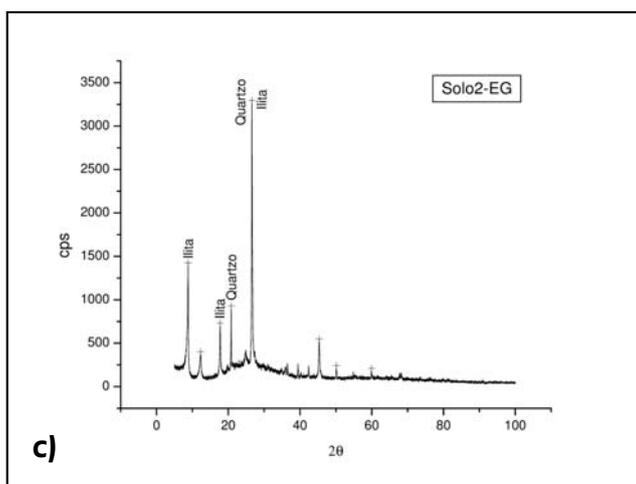
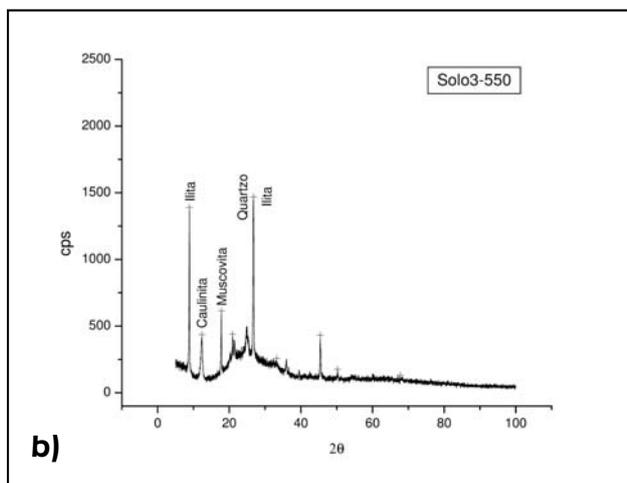
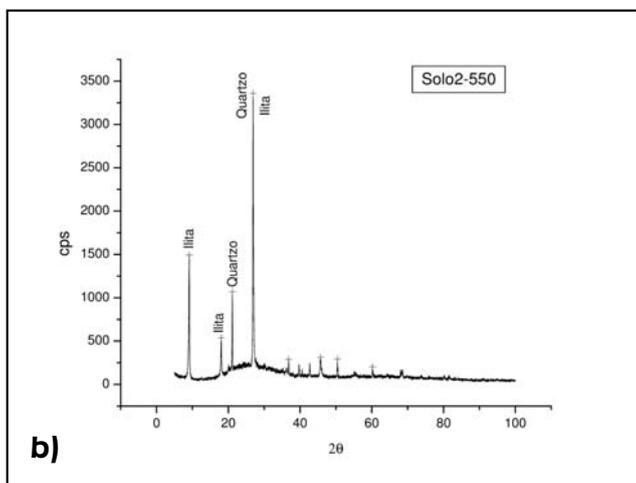
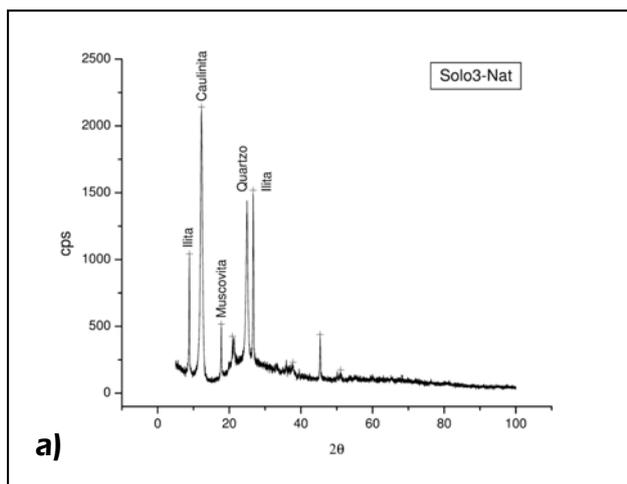
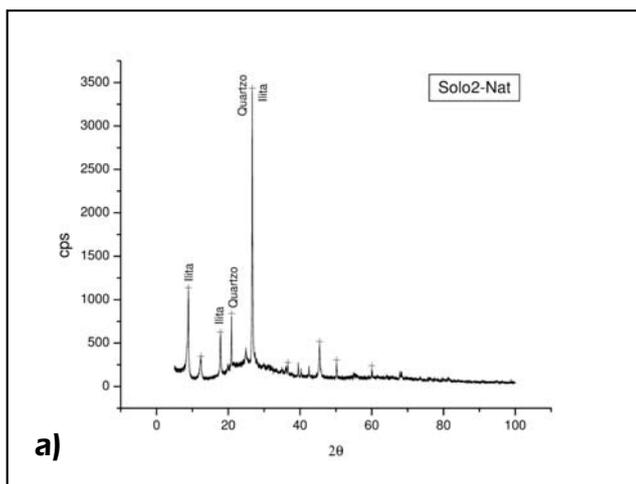


Figura 3. Difractogramas obtidos para o Solo 2, a) Amostra Normal, b) Amostra aquecida, c) Amostra tratada com etileno-glicol.

Figura 4. Difractogramas obtidos para o Solo 3, a) Amostra Normal, b) Amostra aquecida, c) Amostra tratada com etileno-glicol.

Nas Figuras 2a e 2b, nota-se pequena diminuição no pico da caulinita, esse resultado é anômalo, pois o correto era a eliminação ou maior diminuição desse pico, quando aquecido. Esse resultado pode estar ligado com a temperatura empregada no aquecimento, que possivelmente não atingiu 550°C, assim sendo, não ocorreu destruição total desse argilomineral, como era esperado. O pico referente à sepiolita (identificada no solo 1), Figura 2 a, pode ser também interpretado como sendo a muscovita, pois os dois picos são semelhantes. A sepiolita é um argilomineral do grupo das hormitas, sendo comumente encontrado em sedimentos ou depósitos aluvionares. Cabe lembrar, que os solos argilosos investigados são derivados de depósitos aluvionares, podendo indicar que realmente se trata da sepiolita.

A Figura 3 exhibe os minerais detectados no solo 2. Dos três solos investigados, esse é o que apresentou maior teor de quartzo. Na DRX foi possível identificar que esse solo é composto por illita e quartzo.

A Figura 4 exhibe os resultados de DRX obtidos para o solo 3. Nesta figura nota-se diminuição do pico da caulinita quando aquecido (Figura 4b), isso confirma a presença desse argilomineral. Segundo *Mitchell (1993)*, a caulinita é o único argilomineral que tem seu pico alterado quando aquecido a 550°C.

A presença de caulinita foi confirmada nas análises térmicas diferenciais (ATD), conforme Figuras 5, 6 e 7. Os resultados dos ensaios de Análise Térmica Diferencial (ATD) indicaram que, principalmente os solos 1 e 3 apresentam similar comportamento térmico ao sofrerem aquecimento (Figuras 5 e 7). Nos três solos é possível notar evento endotérmico com temperatura próxima de 130°C causado, segundo *Santos (1989)*, pela eliminação de água de umidade e de água adsorvida (Figuras 5, 6 e 7). Outro pico endotérmico foi observado nas proximidades de 300°C, nos três solos, o que possivelmente indica a presença da gibsitita (Figuras 5, 6 e 7).

Nas Figuras 5, 6 e 7, observa-se outro evento endotérmico que ilustra a reação de desidrolização (perda de hidroxilas) com posição do pico nas proximidades dos 600°C. Além dos picos endotérmicos, foi verificado pico exotérmico entre 810 a 948°C. Assim, de acordo com *Tan et al. (1986)* e *Santos (1989)*, tais transformações térmicas referem-se ao comportamento da caulinita ao aquecimento.

Nas análises térmicas diferenciais foi possível identificar a caulinita no solo 2, sendo que pela técnica de DRX o mesmo não foi identificado neste solo.

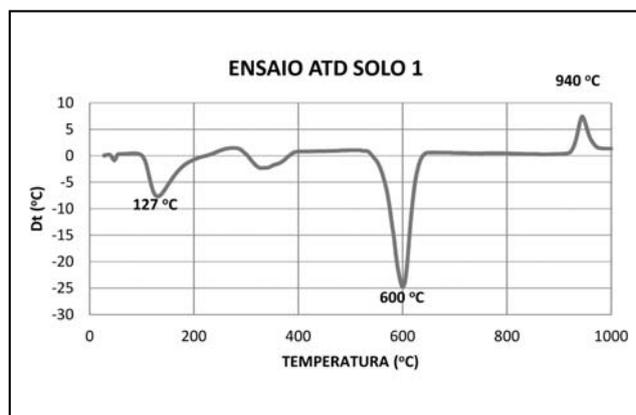


Figura 5. Análise térmica diferencial - Solo 1.

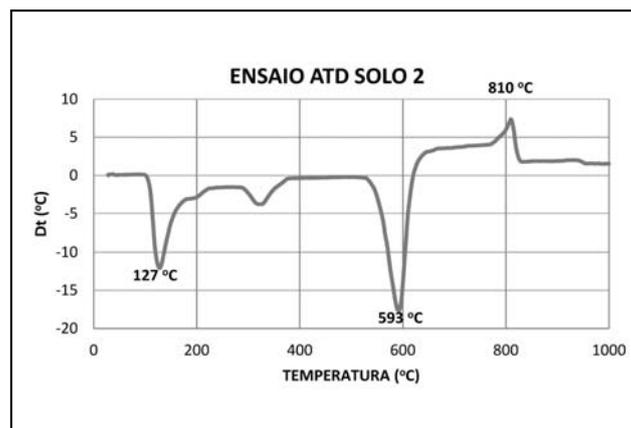


Figura 6. Análise térmica diferencial - Solo 2.

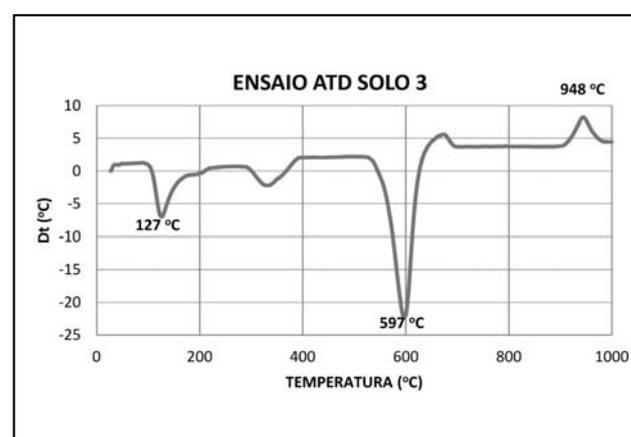


Figura 7. Análise térmica diferencial - Solo 3.

Quanto ao CTC, observou-se que nas três amostras este parâmetro é inferior a 10,0 meq/100g (Tabela 2). Este resultado indica a presença de caulinita, uma vez que o CTC deste argilomineral encontra-se no intervalo de 3 a 15 meq/100g (*Santos, 1989*).

A amostra que apresentou maior CTC foi o solo 2 (9,57 meq/100g), conforme Tabela 2. Por outro lado, a que apresentou menor CTC foi o solo 3 (7,48 meq/100g). De acordo com *Rowe et al. (1995)*, um solo para ser empregado como barreira selante deve ter um CTC de no mínimo 10 meq/100g. Os valores obtidos para os solos 1 e 2 estão relativamente próximos do limite considerado em *Rowe et al. (1995)*.

Tabela 2. Valores de CTC e SE - Solo 1, Solo 2 e Solo 3.

Amostra	CTC (meq/100g)	SE (m ² /g)
Solo 1	8,36	65,29
Solo 2	9,57	74,71
Solo 3	7,48	58,43

Quanto a superfície específica (SE), o solo 1 exibiu valor de 65,29 m²/g, o solo 2 de 74,71 m²/g e o solo 3 de 58,43 m²/g (Tabela 2). A SE está relacionada com a capacidade de retenção e/ou liberação de elementos químicos do solo. Quanto maior a SE, maior possibilidade de interação com os elementos em solução, o que pode favorecer os processos de retenção e atenuação de contaminantes. A SE obtida para o solo 2 está na proximidade da faixa da ilita (80 m²/g), segundo *Rowe et al. (1995)*. Todos os solos, quanto ao SE, podem ser classificados como caulinita (faixa de 15 m²/g).

Conforme *Rowe et al. (1995)*, a ilita quando presente nos solos argilosos geram sistemas de impermeabilização mais confiáveis, o que viabiliza o emprego dos três solos investigados, como indicado nos difratogramas de raios X (Figuras 2, 3 e 4).

Quanto à matéria orgânica, o solo 1 apresentou 11,89 %, o solo 2 apresentou 12,85 % e o solo 3 apresentou 6,34 %. Desta maneira, nota-se que a CTC e SE do solo 2 e 1 estão sendo influenciados pela presença de matéria orgânica, principalmente no caso do solo 2 que é rico em quartzo (gerando baixo CTC). O solo 3 foi o que apresentou menor CTC e SE, consequentemente menor teor de matéria orgânica.

CONCLUSÕES

A partir de todos os resultados apresentados, conclui-se que os três solos coletados na região do Vale do Ribeira são apropriados para serem empregados nos sistemas de barreiras selantes, uma vez que os valores obtidos, principalmente para condutividade hidráulica, índice de plasticidade, teor da fração argila e fração de finos estão dentro das normas técnicas empregadas para esse tipo de obra. Cabe lembrar, que dos três tipos de solos caracterizados, os solos 1 e 2 são os mais adequados para serem empregados como barreira selantes, em decorrência das propriedades geológicas e geotécnicas destes solos

apresentarem valores mais elevados nas distintas propriedades investigadas.

A condutividade hidráulica é um parâmetro de extrema importância na avaliação do emprego de solos como sistemas impermeabilizantes. Desta forma, conclui-se que os três solos analisados são considerados adequados, já que os valores de condutividade hidráulica variaram de 10⁻⁸ a 10⁻⁹ m/s, estando dentro dos valores estabelecidos nas normas técnicas empregadas para barreiras selantes.

Quanto à viabilidade geológica e geotécnica, conclui-se que o solo menos adequado para ser empregado na construção de barreiras selantes é o solo 3, em praticamente todos os ensaios esse material apresentou os menores valores.

A partir da caracterização geotécnica, o solo 1 foi considerado mais apto para ser empregado como barreira selante, em decorrência dos resultados referentes à fração granulométrica e limites de consistência.

Quanto à caracterização geológica o solo 2 apresentou os melhores resultados (valores mais elevados de CTC, SE e MO), mesmo apresentando maior concentração de quartzo. Provavelmente, esses valores estão relacionados, não com a mineralogia, e sim com a matéria orgânica presente neste solo.

A partir dos ensaios de caracterização mineralógica, conclui-se que os argilominerais presentes nos três solos não são expansivos, sendo esses a caulinita (1:1) e a ilita (2:1).

De modo geral, conclui-se que a caracterização geológica e geotécnica de solos argilosos é extremamente importante na orientação do melhor material a ser empregado na construção de barreiras selantes.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo de mestrado.

TRABALHOS CITADOS NO TEXTO

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT-MB32 (NBR7181).

Análise granulométrica.

Rio de Janeiro. 1984. 13p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA - ABNT-MB30 (NBR6459).

Determinação do limite de liquidez.

Rio de Janeiro. 1984. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA - ABNT-MB31 (NBR9180).

Determinação do limite de plasticidade.

Rio de Janeiro. 1984. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA - (NBR 13292).

Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante.

Rio de Janeiro, 1995. 8p.

BUENO, B. DE S.; VILAR, O. M.

Mecânica dos solos.

Universidade de São Paulo, São Carlos, 132 p. 1984.

CHRISTENSEN, T.H., KJELSDEN, P., ALBRECHTSEN, H.-J., HERON, G., NIELSEN, P.H., BJERG, P.L., AND HOLM, P.E.

Attenuation of landfill leachate pollutants in aquifers.

Crift. Rev. Environ. Sci. Technol, (24), 1994.

DANIEL, D. E.

Soil barrier layers versus geosynthetic barriers in landfill cover systems.

In: *Landfill Closures, ASCE, Geotechnical Special Publication (53), p.1-18. 1993.*

- EUSTERHUES, K.; RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I.
Stabilization of soil organic matter isolated via oxidative degradation.
Organic Geochemistry. (36), p.1567-1575. 2005.
- FOLKES, D. J.
Control of contaminat migration by the use of liners.
Canadian. Geotechnical Journal (Fifth Canadian Geotechnical Colloquium), 1982.
- GRIM, R. E.
Clay Mineralogy.
New York: McGraw-Hill. p. 132-133. 1953.
- MITCHELL, J. K.
Fundamentals of soil behavior.
Jhon Wiley & Sons, Inc. Califórnia. Estados Unidos. 437p. 1993.
- LEITE, A. L.
Migração de íons inorgânicos em alguns solos tropicais, com ênfase nos processos de sorção e difusão molecular.
Tese de Doutorado.
Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. p. 120. 2001.
- PEJON, O. J.
Mapeamento geotécnico da Folha Piracicaba-SP (escala 1:100.000): Estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos.
Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos. 1992. 2v.
- PINTO, C. S.
Curso básico de mecânica de solos.
Oficina de Textos. 247p. 2000.
- ROQUE, A. J. P. M.
Transfert advectif et diffusive de polluants inorganiques dans lês barrieres d'étancheite minerales presents dans les centres de stockage de dechets. Aplicacion aux sols fins portugais.
Teses e programas de investigação LNEC. Lisboa. 624p. 2004.
- ROWE, R. K.; QUIKLEY, R. M.; BOOKER, J. R.
Clayey barrier systems for waste disposal facilities.
London. 390p. 1995.
- SANTOS, P. DE S.
Ciência e tecnologia das argilas.
Editora Edgard Blucher LTDA, São Paulo, SP. 408 p. 1989.
- SHARMA, H. D.; LEWIS S. P.
Waste containment systems, waste stabilization, and landfills: Design and Evaluation.
Wiley - Interscience. U.S.A. 588p. 1994.
- TAN, K. H.; HAJEK, B. F.; BARSHAD, I.
Thermal analysis techniques. In Klute, A. Methods of soil analysis - Physical and mineralogical methods.
Second Edition. American Society of Agronomy. p.151-183. 1986.
- VELDE, B.
Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significances.
Chapman & Hall: Cambridge. 198 p. 1992.
- YONG, R. N.; MOHAMED, A. M. O.; WARKENTIN, B. P.
Principles of contaminant transport in soils.
Developments in Geotechnical Engineering, Amsterdam: Elsevier Science Publishers. 327p. 1992.



Identificación de materiales asbestiformes en la ex usina General San Martín, Ingeniero White (provincia de Buenos Aires)

Identification of asbestiforms materials in the ex plant General San Martín, Ingeniero White (province of Buenos Aires)

Lescano, Leticia ¹⁻² ✉ - Maiza, Pedro J. ¹⁻³ - Marfil, Silvina A. ¹⁻⁴

Recibido: 28 de Junio de 2012 • Aceptado: 21 de Mayo de 2013

Resumen

La ex usina general San Martín, fue construida en la década del '30 para proveer de energía eléctrica a la ciudad de Bahía Blanca. Fue desafectada de sus servicios en 1987, y su desguace comenzó en 1997. Su estructura edilicia muestra deterioros significativos, sin embargo el principal interés ambiental dentro de este edificio es la presencia de materiales asbestiformes, por lo que deberán tomarse medidas precautorias al momento de la puesta en valor. Se localiza en un sector densamente poblado (en el puerto de Ing. White), negativo a efectos ambientales debido que las fibras de asbestos al ser livianas se esparcen fácilmente por largas distancias.

Con el objeto de identificar los materiales que contienen asbestos, se tomaron muestras del piso (baldosas y alisado de cemento), paredes, columnas, bloques caídos de los techos (fibrocemento) y tuberías. Para la identificación y caracterización de los minerales asbestiformes, se utilizó estereomicroscopio, microscopio petrográfico, difracción de rayos X, EDS y SEM.

Se concluyó que no todos los materiales a remover contienen minerales perjudiciales para la salud ya que los asbestos sólo se hallaron en fibrocementos, pintura asfáltica y en los aislantes de los tubos de drenaje de agua para refrigeración de turbinas, distribuidos puntualmente y con ubicuidad clara. Se determinó la presencia de dos especies minerales correspondientes al grupo de los asbestos: crisotilo y anfíboles los que presentan diferente comportamiento a los agentes exógenos y grado de nocividad en la salud humana.

Palabras clave: *asbesto, medioambiente, materiales de construcción.*

1. Departamento de Geología-UNS. San Juan 670, Bahía Blanca.
TE. 54-291-4595101 int. 3021

2. Becaria. Comisión de Investigaciones Científicas de la
Prov. de Bs. As.

✉ leticia.lescano@uns.edu.ar

3. Investigador Principal CONICET-INGEOSUR.

4. Investigador Independiente. Comisión de Investigaciones
Científicas de la Prov. de Bs. As.

Abstract

The ex plant General San Martín was built in the 30s to provide electric power to the city of Bahía Blanca. In 1987 was disaffected of their services and their dismantling began in 1997. The architecture shows significant deterioration, but the principal environmental interest in this building is the presence of asbestiform minerals. This is an obstacle to their habilitation and precautionary measures should be taken when it would be enhancement. It is located in a densely populated area (in Ing. White port), negative to environmental effect because asbestos are light and can be easily spread by long distances.

With the aim to determine the materials containing asbestos, samples from the floor (fibrocement and screeded cement), walls, columns, fallen blocks from the floor (fibrocement) and pipes were taken. For the identification and characterization of asbestiform minerals, stereomicroscope, petrographic microscope, X ray diffraction, SEM and EDS were used.

It was concluded that not all the material to remove containing minerals harmful to health because asbestos was only founded in fibrocements, asphaltic paint and as coating for drainage tubes for cooling water from turbines, distributed promptly with clearly ubiquitous. The presence of two type of asbestos minerals were determined: chrysotile and amphibole which have different behavior to exogenous agents and degree of harm to human health

Keywords: *asbesto, environment, construction materials.*

INTRODUCCIÓN

El edificio de la ex usina General San Martín, conocida también como "La usina del castillo", fue construido a mediados de la década del 30, por la empresa alemana Geopé, para proveer de energía eléctrica a la ciudad de Bahía Blanca. Se encuentra en la zona del puerto de Ing. White. El predio se ubicó en una zona afectada por las mareas y fue rellenado con materiales de refulado. Para el emplazamiento de la obra fue necesario realizar un pilotaje de hormigón hasta una profundidad de 10 a 13 m, nivel en el que encuentra un sedimento con valor soporte adecuado para una obra de esta envergadura.

La usina fue desafectada en el año 1987, cuando entró en funcionamiento la central termoeléctrica "Luis Piedra Buena". El desguace comenzó en 1997.

El edificio (Figura 1), presenta deterioro tanto en su interior como en sus paredes exteriores. Los trabajos de remodelación y puesta en valor harán necesario remover muchos materiales, entre los que se han identificado algunos que pueden ocasionar problemas ambientales. El principal cuidado que deberá tomarse para recuperar este edificio y que es necesario evaluar, es la presencia de materiales asbestiformes usados en diferentes partes de la construcción.

El edificio fue transferido a la Municipalidad de Bahía Blanca en el año 2001, quien consideró prioritario resolver la problemática de contaminación con asbestos. Además, actualmente algunos sectores presentan un estado de deterioro tal, que existe riesgo de derrumbe de la mampostería.

Asbesto (o amianto) es un término comercial que involucra a un grupo de minerales del grupo de la serpentina (cristotilo) y anfíboles (crocidolita, amosita, antofilita, actinolita y tremolita). Presentan hábito fibroso, son flexibles, resistentes a la tracción, al calor, al fuego y a la degradación química o biológica (Zoltai, 1981). Debido a estas características las fibras de estos minerales pueden penetrar en las vías respiratorias y acumularse en los pulmones, desarrollando cáncer o asbestosis (Battista, et al. 2006).

En Argentina, los asbestos se encuentran prohibidos desde el año 2000 por resolución del Ministerio de Salud (845/00 y 823/01). Si bien estas resoluciones siguen vigentes en la

actualidad, las medidas adoptadas consisten en retirar del mercado los productos que contienen asbesto, reubicarlos y reemplazarlos por otros materiales (Rodríguez, 2004).

La exposición al asbesto, afecta principalmente a las personas que residen cerca de un punto de emisión e inhalan el polvo disperso en el aire. Las fibras pueden pasar al aire o al agua no sólo por la degradación de los productos manufacturados sino también por la erosión de depósitos naturales. El agua potable puede contener asbestos procedentes de fuentes naturales o de tuberías de fibrocemento que los contienen. Las fibras y las partículas de diámetro pequeño pueden permanecer suspendidas en el aire durante largo tiempo y ser transportadas grandes distancias por el viento y el agua antes de depositarse. No pueden movilizarse a través del suelo permaneciendo inalteradas durante largo tiempo dado que no son degradadas a otros compuestos (Luis, et al. 2009).

Aunque la peligrosidad del amianto es conocida desde comienzos de la década del '30, este material se ha utilizado en una gran variedad de materiales de construcción hasta finales de los '70. Desde 1930 a 1980, decenas de millones de toneladas de amianto fueron colocadas en barcos, fábricas, trenes, centrales eléctricas, astilleros, en la industria de la construcción, edificios, salas de calderas, e incluso en viviendas y automóviles.

Con el objetivo de determinar los materiales que contienen asbestos y caracterizar su composición mineralógica en la ex usina "General San Martín", se tomaron muestras con la autorización de la Secretaría de Medio Ambiente de la Municipalidad de Bahía Blanca y del personal a cargo de la seguridad del edificio.

UBICACIÓN Y ENTORNO AMBIENTAL

El predio está ubicado en la localidad de Ing. White, partido de Bahía Blanca, en la Provincia de Buenos Aires, Argentina. Se accede por la ruta nacional 252, en la zona portuaria.

Presenta importantes signos de deterioro, aunque el principal interés enfocado en este trabajo es de tipo ambiental, debido a la presencia de materiales asbestiformes. Esto obstaculiza su habilitación y deberán tomarse medidas precautorias al momento de la puesta en valor.



Figura 1. Usina del Castillo.

Se localiza en un sector densamente poblado, por lo que será necesario planificar con criterio la movilización de los materiales y su disposición final.

Por tratarse de partículas muy finas, livianas, y a veces hasta microscópicas, se esparcen fácilmente por largas distancias, pudiendo afectar a los centros poblados cercanos. La contaminación ambiental por amianto comienza por la degradación de fibras debido a la acción de agentes exógenos, deterioro con el uso, por la vibración y el envejecimiento natural de los minerales propios del asbesto o de los materiales que los aglutina. Cuando esto sucede, las fibras se desintegran y se movilizan en el ambiente, especialmente en el polvo en suspensión. En la actualidad uno de los mayores riesgos para los trabajadores de la construcción, especialmente los que participan en la renovación

o reparación de edificios antiguos, es la exposición al amianto ya que involucra el riesgo de contraer enfermedades pulmonares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se tomaron muestras de los pisos (baldosas y alisado de cemento), paredes, columnas, bloques caídos de los techos (fibrocemento), tuberías, y todo material que se consideró de interés para este trabajo. Se caracterizaron los materiales y se identificaron las especies minerales que los componen. Se separaron los minerales asbestiformes y se analizaron a grano suelto, con microscopio petrográfico sobre secciones delgadas, por difracción de rayos X, y microscopía electrónica de barrido - EDS.

Para ello se utilizó un microscopio petrográfico Olympus B2-UMA trinocular con video cámara Sony 151A y el programa Image-Pro Plus para captura y procesamiento de imágenes, un difractor Rigaku D-Max III, con radiación de $\text{Cu-K}\alpha$ y monocromador de grafito, operado con 35 kV y 15 mA con un ángulo de barrido entre 2° y 60° (2θ $\text{Cu K}\alpha$) y un microscopio electrónico de barrido JEOL 35 CF equipado con sonda EDAX para el análisis químico cualitativo de microareas. Las muestras fueron metalizadas con oro.

RESULTADOS

Análisis de los materiales extraídos

Materiales fragmentarios acumulados como escombros

Se tomaron muestras de fragmentos de placas y chapas canaleta de fibrocemento, obtenidas entre los escombros que rellenan parcialmente las tolvas (Figura 2A). Este material constituía parte del techo de la estructura (Figura 2B).

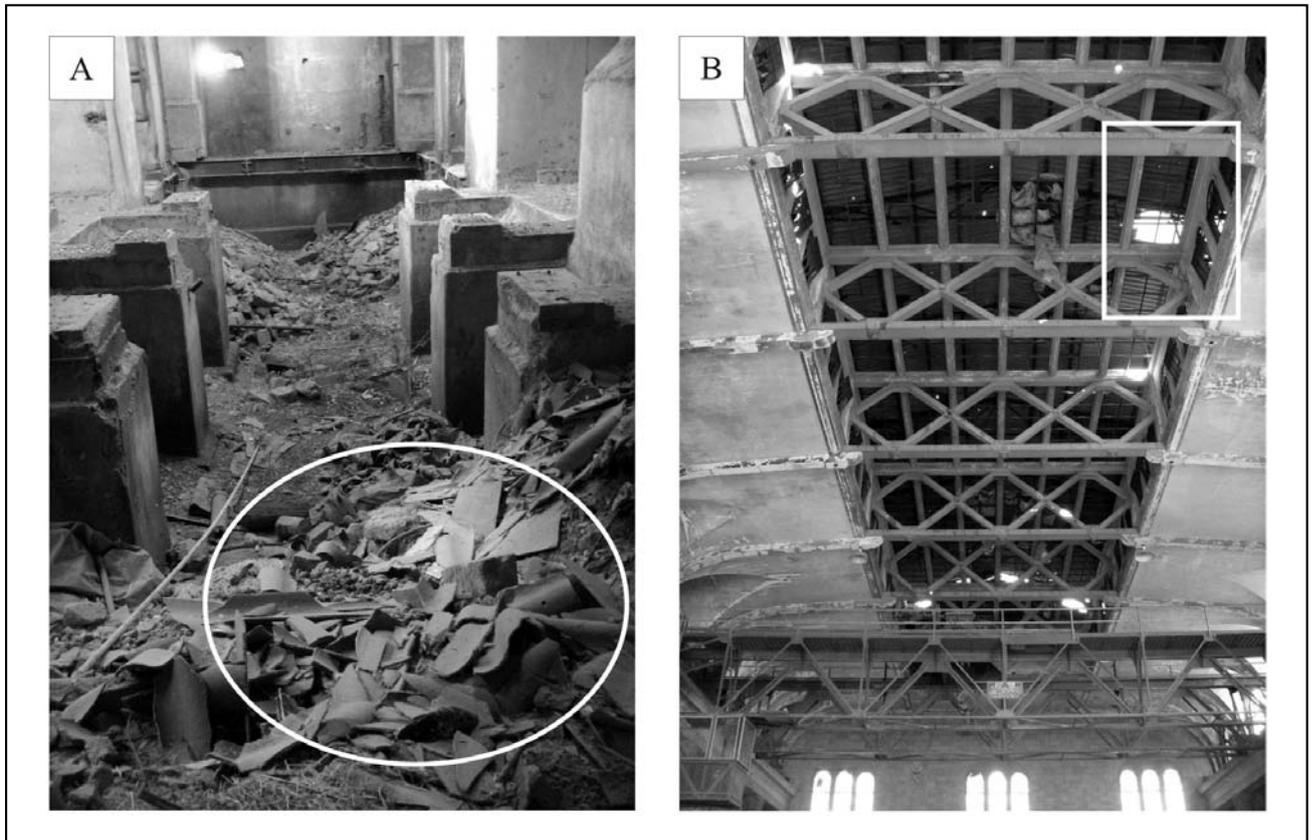


Figura 2. A. Planta baja. Escombros y fragmentos de losas en el suelo. La zona marcada indica el material muestreado. B. En el sector recuadrado se observa la posición original que ocupaban las losas.

El fibrocemento está constituido por una mezcla de cemento y asbestos como fibras de refuerzo. Estos últimos, se utilizaban por su elevada resistencia mecánica, en una proporción de hasta un 25%. En la actualidad se los reemplaza por fibras cerámicas, de vidrio o de carbono.

La canaleta analizada presenta una parte convexa (hacia el exterior) y posee un espesor de unos 6 a 7 mm (Figura 3A). Este material está constituido por capas sucesivas de mortero con asbesto, dispuesto subparalelamente hacia el exterior de la chapa. Ambas superficies muestran una textura característica producida por compactación durante el proceso constructivo.

Se separó el material fibroso y se analizó con esteromicroscopio. El tamaño de las fibras varía, desde el mm hasta 1 cm de largo. Presentan características asbestiformes, es decir, flexibilidad, resistencia a la rotura y elasticidad. Son de color blanquecino y no muestran evidencias de corrosión. Las fibras no son abundantes y se concentran principalmente en la superficie de las canaletas y en algunas capas internas.

Por difracción de rayos X se identificó cuarzo, yeso, feldespato y crisotilo. Este mineral, se determinó por sus máximas reflexiones en 7,32, 3,66 y 2,45 Å, comparables con la ficha ICDD 31-808 (ICDD, 1986) (Figura 3B).

Bajo microscopio de polarización, sobre grano suelto, se observaron fibras rizadas y curvadas, que se separan en otras de menor tamaño, especialmente más delgadas. Son muy abundantes las partículas de óxidos de hierro, agregados pétreos y material cementíceo.

Se realizó un corte delgado transversal a la chapa para observar la distribución de las fibras de asbestos. Se reconocieron claras diferencias composicionales entre el sector expuesto y la zona interna. En la Figura 4A, se observa el contacto entre ambos sectores: tonos rojizos debido a los óxidos de hierro en el sector interno de la teja y tonalidades claras en la zona expuesta a condiciones exógenas durante décadas. Los cristales fibrosos (y en algunos casos aciculares) presentan bajo índice de refracción, extinción paralela y relieve moderado. Por sus

características ópticas se determinó como crisotilo. Se reconocen algunos cristales de cuarzo y feldespato dentro del mallado fibroso, enmascarados por óxidos de hierro. En la Figura 4B, se observa un sector donde la capa expuesta a las condiciones exógenas, presenta mayor espesor y las fibras aparecen como agregados de mayor tamaño. Existe una variación sustancial en el tamaño de las fibras (entre 15 y 100 µm de largo). Se reconocen paquetes entrelazados.

Se observó además un tipo de chapa de fibrocemento plana, utilizada en paneles. El espesor de la muestra es de 4 a 5 mm y su estructura es diferente a la descrita anteriormente. Presenta abundante cantidad de materiales fibrosos, con características asbestiformes, en sus dos superficies exteriores. Una de ellas tiene buena terminación, es lisa y no sobresalen las fibras. La otra, tiene la típica textura que deja la prensa al ser compactada y es posible observar algunas fibras en la superficie (Figura 5A). Con estereomicroscopio se observó la sección transversal de la placa constituida por material cementíceo, clásico, principalmente arena y material fibroso, de color blanquecino característico del crisotilo, comúnmente llamado asbesto blanco. La longitud de las fibras es variable, alcanzando en algunos sectores 0,5 cm. Son suaves y se entrelazan de manera natural. Otra característica destacable de estos minerales, es que pueden ser tejidos o juntados por presión con gran facilidad.

Por difracción de rayos X se identificó cuarzo, feldespato y en menor proporción calcita y crisotilo, además de materiales amorfos (Figura 5B).

Al microscopio óptico, los minerales asbestiformes presentan extinción recta, son flexibles y se separan en fibras de menor tamaño (Figura 6A).

En un corte transversal de la placa, sobre secciones delgadas, se observa abundante cantidad de óxidos de hierro, cuarzo, feldespato y carbonatos de la pasta cementícea. No se reconoce lavado del material ni concentración de minerales fibrosos, como es el caso de la teja descrita anteriormente. Las fibras se observan dispersas, presentan leve coloración, pleocroísmo y extinción paralela. Por sus características ópticas se determinó

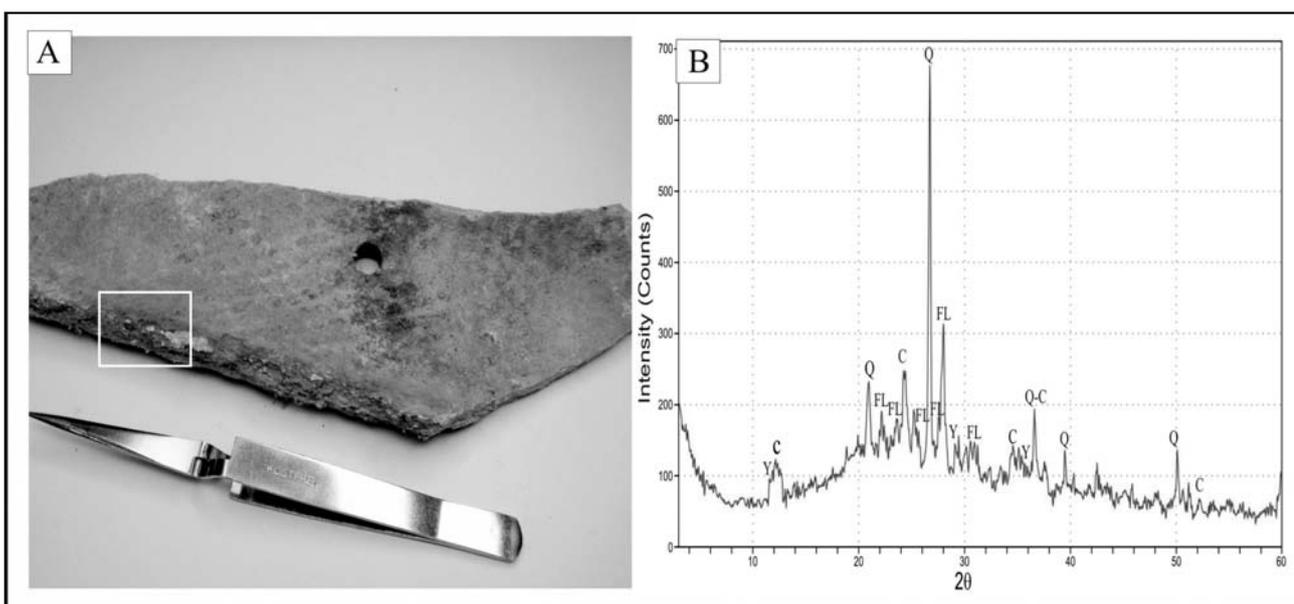


Figura 3. A. Fragmento de canaleta compuesta por capas sucesivas de mortero con asbesto. B. DRX de la canaleta (Y: yeso, C: crisotilo, FL: feldespato y Q: cuarzo).

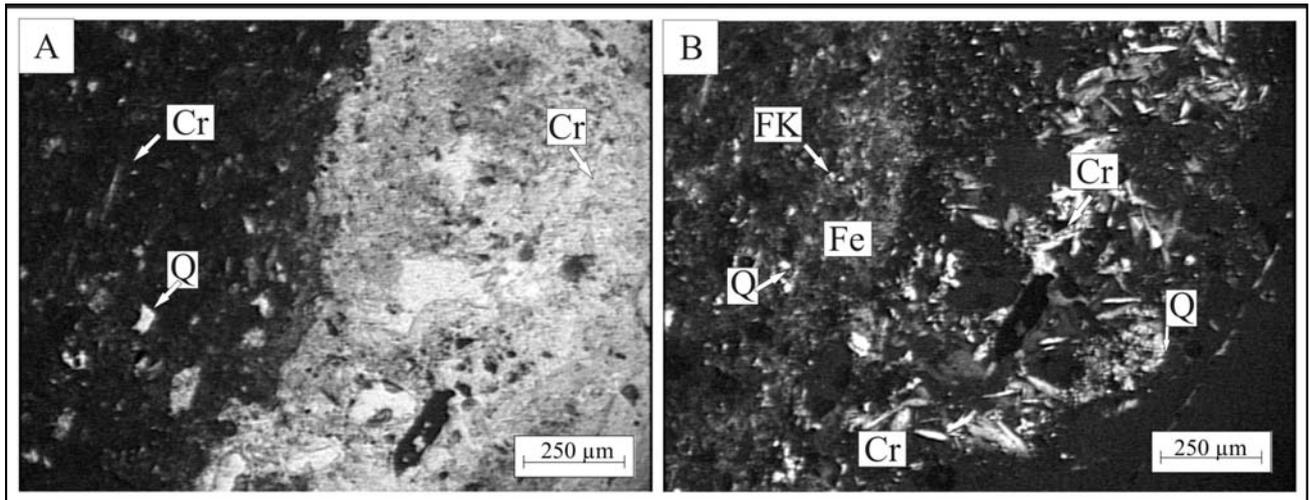


Figura 4. Contacto entre el material expuesto y la zona interna. A. Con luz paralela. B. Con nicols cruzados. Cr: crisotilo, Q: cuarzo, FK: feldspato potásico, FE: óxidos de hierro.

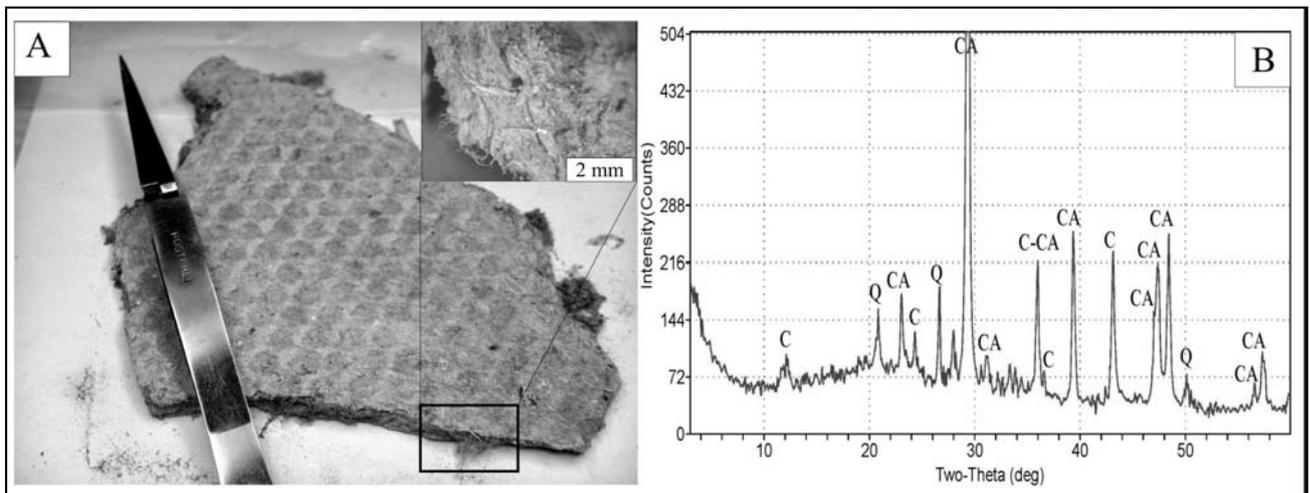


Figura 5. A. Fragmento de chapa donde se distingue la textura superficial por compactación. B. DRX del material cementíceo (C: crisotilo, Q: cuarzo, CA: calcita).

como crisotilo. Su morfología es fibrosa y flexible, no se observan fibras hiladas. Los tamaños son variables, presentando las más extensas una longitud superior a 300 µm. En la Figura 6B se observa un cristal de cuarzo con extinción ondulante y baja birrefringencia, dentro de la pasta y fibras de crisotilo con sus extremos quebrados y aciculares. Cabe destacar que en este material las fibras están esparcidas por toda la sección y son abundantes.

Con microscopio electrónico de barrido se observó la morfología típica de minerales asbestiformes, especialmente las características del crisotilo. En la Figura 7A, se muestra las fibras rizadas y curvadas del mineral con un largo que supera los 500 µm. Debido a su entrelazamiento y su longitud es casi imposible distinguir el comienzo y el final de una misma fibra. Las fibras se entretrejen de manera natural y se desmenuzan las puntas generando fibras rizadas más pequeñas. Se reconocieron impurezas de minerales carbonáticos y clásticos relacionados con el material cementíceo e inerte de la losa. En la Figura 7B, se muestra el espectro EDS donde se identificó Si, O y Mg,

constituyentes principales del crisotilo y Ca relacionado a con la calcita del cemento y de las impurezas.

Parte inferior del revestimiento de las columnas

Los materiales analizados se obtuvieron de los pedestales de las columnas del primer piso del edificio, nivel donde se localizaban los generadores (Figura 8A). Están compuestos por "material refractario" premoldeado y calcinado. La arena es de grano grueso con matrix litológicamente semejante y muy escaso cemento, sinterizado como consecuencia del proceso de calcinación a la que fue sometida para obtener determinadas características físicas, mecánicas y químicas. Macroscópicamente, no se observaron materiales asbestiformes.

Por DRX se determinó la presencia de mullita con cristobalita subordinada. De los minerales originales de la arena solo se conserva cuarzo relicto (Figura 8B).

Al microscopio no se identificaron minerales asbestiformes en el recubrimiento de columnas.

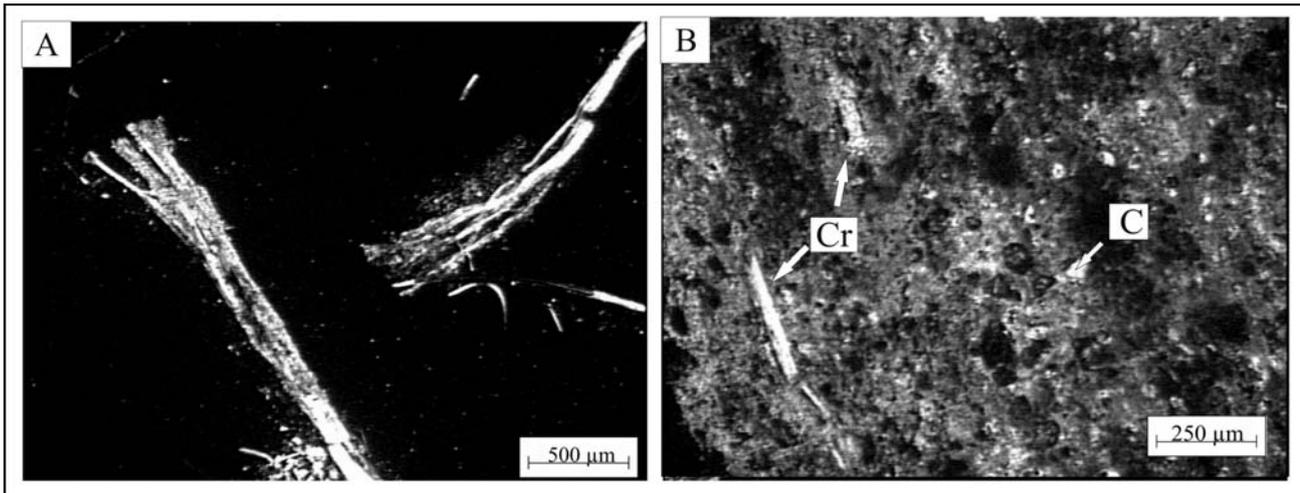


Figura 6. Microscopía de polarización con nicóles cruzados. A. Fibras flexibles de crisotilo, (grano suelto). B. Fibras dentro del material de las placas (en secciones delgadas). Cr: crisotilo, C: carbonatos.

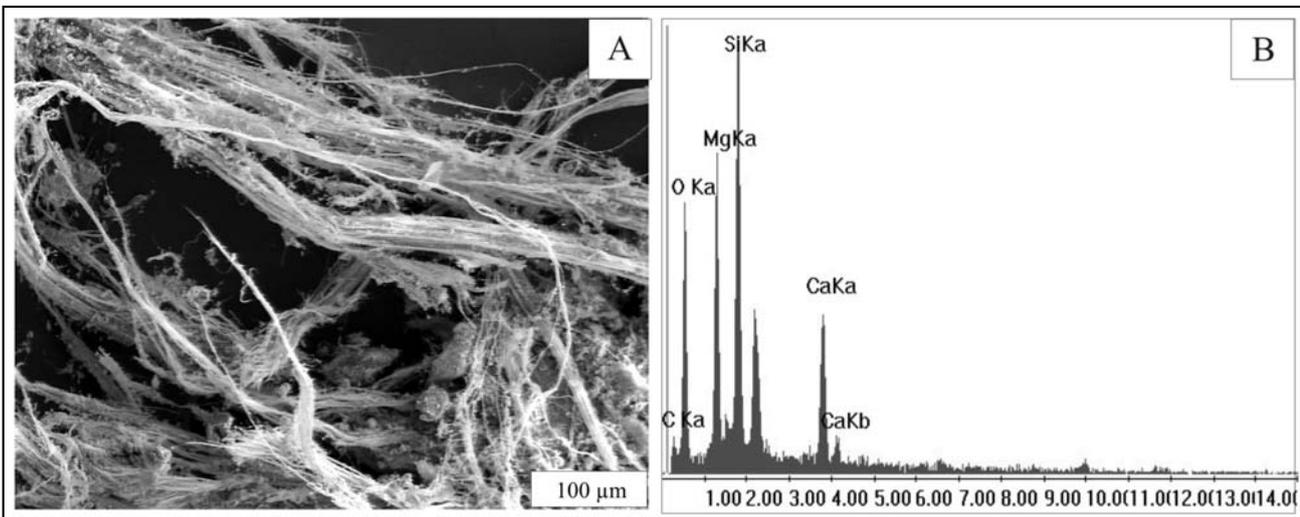


Figura 7. A. Fibras extensas, rizadas y curvadas de crisotilo. B. EDS del material 7A.

Material de recubrimiento de columnas

Se tomaron muestras de los recubrimientos de las columnas de hormigón de la planta baja tanto de la capa gruesa, como de la fina y de la pintura exterior. Tienen un espesor promedio de 1,7 a 3 cm. La capa gruesa, sector más profundo en contacto con el hormigón, está constituida por arena con abundante cuarzo, clastos líticos de vulcanitas (principalmente riolíticas), areniscas cuarzosas, escasos minerales opacos y restos orgánicos de bivalvos (Figura 9A). El mortero y el aglutinante se conservan en buen estado y hay evidencias del uso de cal (la calcita es relativamente abundante). En este material no se observaron fibras.

La superficie de las columnas analizadas está recubierta con una pintura asfáltica, que contiene abundante material fibroso. La porosidad es normal y se observaron algunas fisuras vacías. En la superficie se reconocieron zonas carbonatizadas. El recubrimiento externo se realizó con una arena cuarzosa (tipo

arena oriental) otorgándole una excelente terminación (como si se tratara de un estucado).

En la pintura relíctica se observaron abundantes fibras birrefringentes de dimensiones variables, con largos que van desde los 100 micrones hasta superiores a 4 mm (Figura 9B). El ancho no supera los 10 micrones. Se separaron de la pintura y analizaron con microscopio de polarización. Por sus características ópticas corresponden a crisotilo. Por DRX no se identificaron minerales asbestiformes. En el material del recubrimiento externo también se observaron estas fibras pero se adjudicaron a componentes de la pintura que infiltró al revoque.

En secciones delgadas, sobre una sección transversal del hormigón de recubrimiento de las columnas, se observan abundantes cristales de cuarzo subredondeados, con extinción ondulante, clastos de rocas volcánicas (riolitas y traquitas), restos de valvas, plagioclasa, minerales opacos y feldespato potásico.

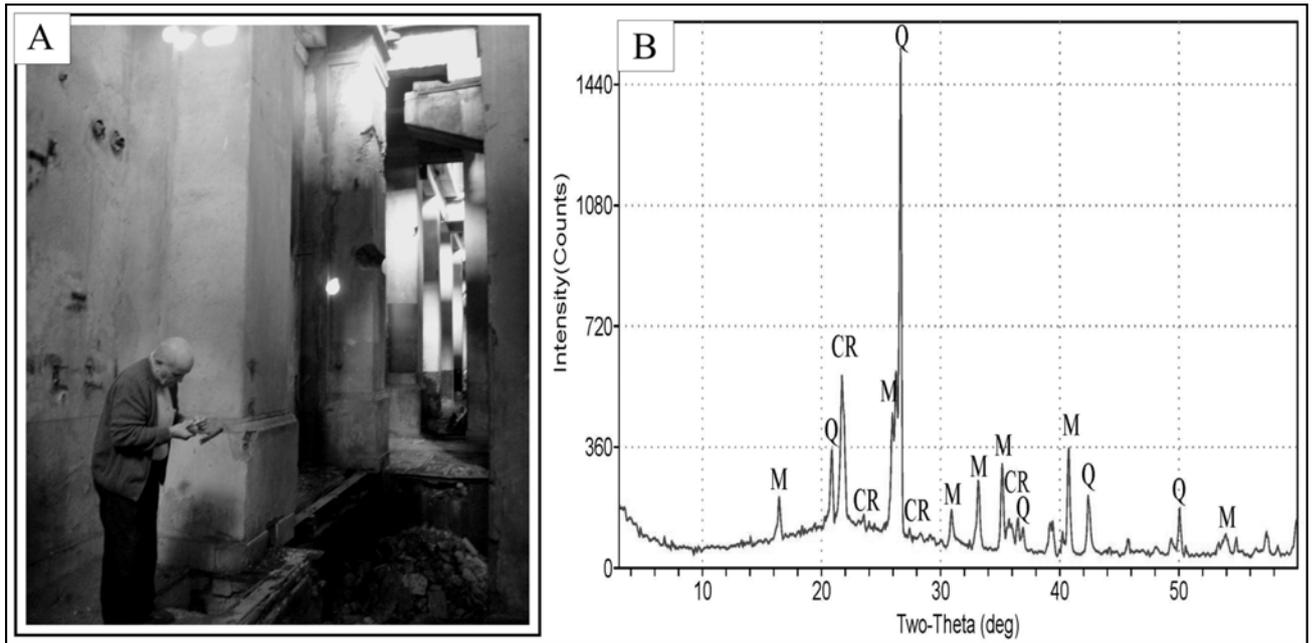


Figura 8. A. Muestreo en los pedestales de las columnas, primer piso del edificio. En el hueco del piso se localizaban los generadores. B. DRX del material (M: mullita, Q: cuarzo y Cr: cristobalita).

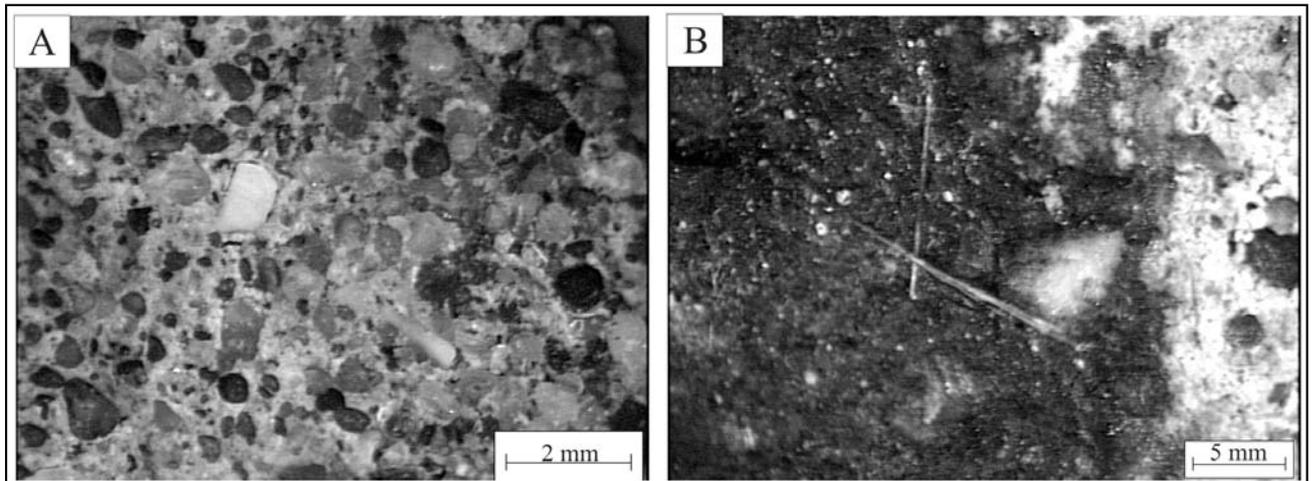


Figura 9. A. Capa gruesa en contacto con el hormigón de las columnas. B. Pintura asfáltica con material fibroso (con estereomicroscopio).

La pasta cementicia contiene oxidados de hierro. Presenta algunas fisuras. No se observaron minerales fibrosos (Figura 10A). En la pintura asfáltica se identificaron los clastos antes mencionados y dos tipos de fibras. Una con características de fibras textiles u orgánicas (es poco abundante), rizada, presenta leve birrefringencia y extinción ondulante no muy clara. El otro tipo de fibras tiene extinción recta, birrefringencia moderada son más cortas y terminan en punta. Se presentan asiladas, incluidas en el material adherente. Por sus características ópticas se determinaron como crisotilo (Figura 10B).

Sella-junta de una tolva

La muestra corresponde al marco de una abertura de inspección de un tanque. Se analizó un trozo de 4 x 9,5 cm y un

espesor de aproximadamente 10 mm (Figura 11A). Son de fieltro, están constituidas por un material fibroso incluido en la pintura asfáltica y arena usadas para sellar la tapa. Está impregnada de aceite o combustible. Las fibras, al calcinarse se disgregan y se queman. Por difracción de rayos X, se identificó cuarzo, yeso y talco, (utilizado como inerte con el material fibroso amorfo) (Figura 11B). No se identificaron minerales asbestiformes.

En otros sectores de la estructura se reconoció un material sellajuntas con características similares al mencionado anteriormente. En su composición se identificó cáñamo, muy deteriorado, con sectores que aún conservan el asfalto. Al calcinarse queda como producto final arena y ceniza. No se

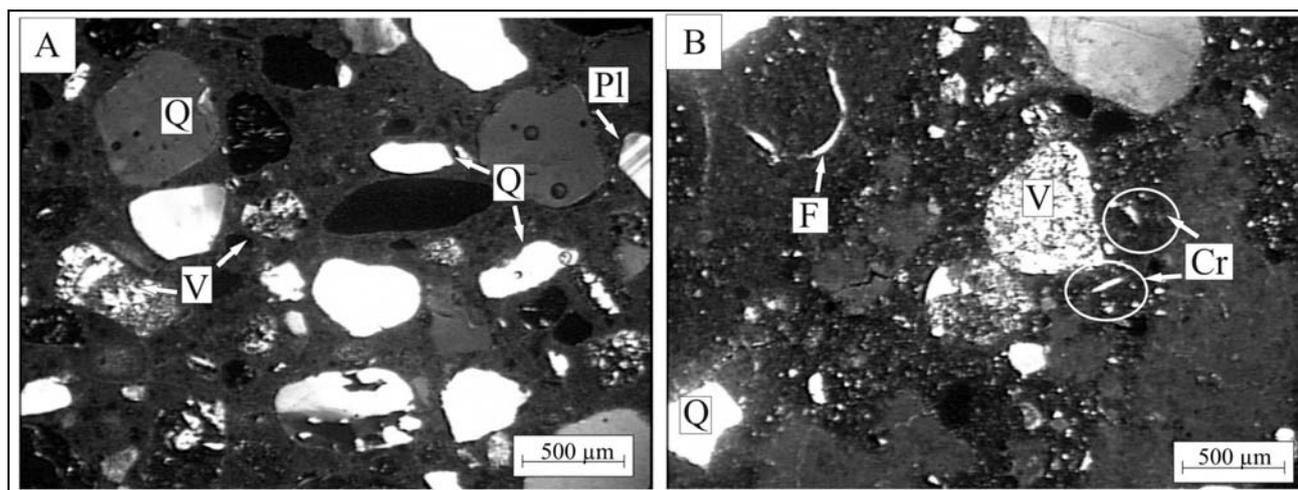


Figura 10. A. Hormigón de la columna. B. Recubrimiento, pintura asfáltica. (Q: cuarzo, V: vulcanita, Pl: plagioclase, F: fibra textil y Cr: crisotilo).

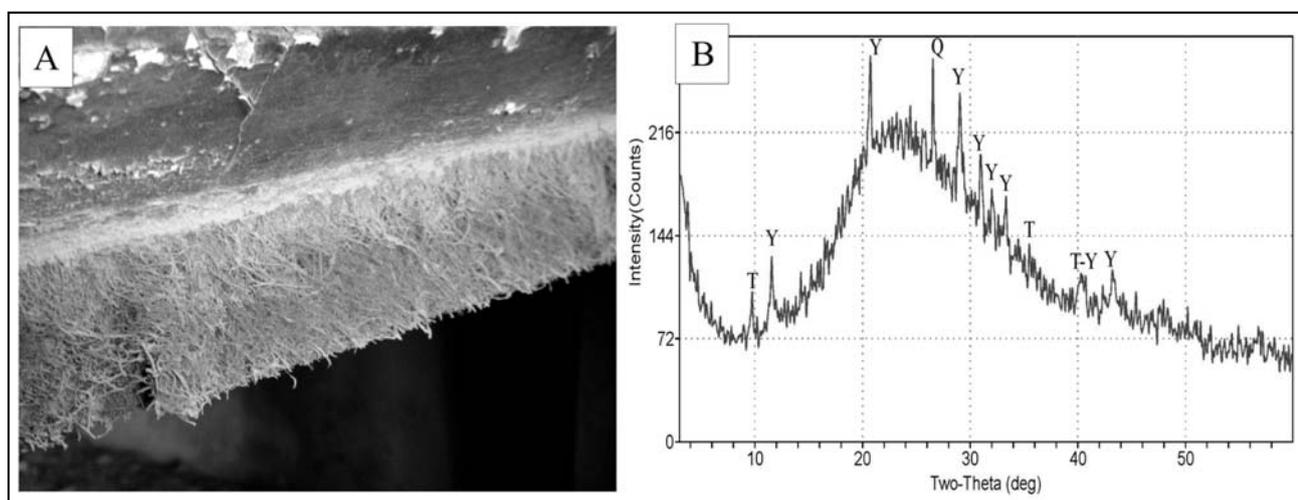


Figura 11. A. Detalle del marco, donde se observa el fieltro fibroso (sella-junta). B. DRX del material fibroso de la sella-junta (T: talco, Y: yeso, Q: cuarzo).

reconocieron fibras asociadas que pudieran asimilarse a minerales asbestiformes.

Hormigón de las columnas

Se analizó el hormigón de las columnas a fin de identificar la posible presencia de minerales asbestiformes. El agregado grueso es un canto rodado natural constituido por aproximadamente un 75% de rocas volcánicas básicas y ácidas, parcialmente argilizadas y teñidas con óxidos de hierro, lixiviados por los procesos de alteración. El tamaño es variable, en algunos casos sobrepasan los 2 cm de diámetro (Figura 12A). Predominan las formas redondeadas y son escasas las planares. Su adherencia al mortero es buena y no se reconocieron partículas desprendidas. El mortero está constituido por arena natural y cemento, bien conformado, físicamente estable y sin fisuración ni eflorescencias.

En la composición de la arena predomina cuarzo, rocas volcánicas, tobas y areniscas. Son raras las rocas graníticas y se observaron esporádicamente trizas de vidrio y calcedonia. En algunos sectores se ha producido un asentamiento, ya que las formas son más o menos planares, están sub-orientadas

paralelamente y tienen elevada porosidad en determinados planos. No se observaron minerales fibrosos en ninguno de los componentes del hormigón. Esto es importante al momento de poner en valor la estructura o movilizar estos materiales ya que no presentan un riesgo ambiental.

Hormigones de relleno

Para nivelar las losas del piso se utilizó un hormigón liviano de relleno. En la superficie de éstas, se colocó el material cerámico y las baldosas graníticas del piso. El agregado grueso es un canto rodado natural, constituido por rocas volcánicas, con tobas subordinadas y escasas rocas graníticas. La arena tiene composición litológica semejante. El mortero está bien cementado pero con alta porosidad. Algunos sectores tienen adherido el pegamento del material del piso. En los sitios libres de este pegamento ha precipitado calcita. No se observaron materiales fibrosos que pudieran considerarse asbestiformes.

Zócalos

Los zócalos de las columnas están compuestos por baldosas, en muchos casos con evidencias de deterioro. Este material

se encuentra constituido por dos capas: una externa (expuesta al ambiente) y una interna (en contacto con el pegamento) (Figura 12B)

La zona externa está compuesta por escallas de dolomía (color blanco) y cemento blanco coloreado con ocre amarillo. Tiene un espesor aproximado de 0,5 a 0,8 cm. Presenta carbonatación superficial y tinción pardo amarillenta. Por difracción de rayos X se identificó calcita, dolomita (parte del granulado dolomítico) y hematita (contaminación por lixiviación del metal).

El sector interno constituye el cuerpo del mosaico. En éste el agregado está constituido por arena en cuya composición participan cuarzo, clastos líticos (principalmente vulcanitas), trizas de vidrio y valvas carbonáticas. No se identificaron partículas asbestiformes.

Materiales aislantes de un cielorraso

En un sobretecho, construido en una etapa más reciente, en el segundo piso, se reconocieron y relevaron dos materiales aislantes, con características fibrosas, que presentan composición y morfología diferente. Uno corresponde a una placa del cielorraso y el otro es un material adherido a la placa (Figura 13A). Este último se presenta como masas fibrosas entrelazadas, aisladas y dispersas debido a la degradación de los componentes. Tiene una coloración parda debido al envejecimiento y a la tinción con óxidos e hidróxidos de hierro. Al microscopio es isótropo. Por sus propiedades ópticas, y su facilidad para la molienda se determinó como fibra de vidrio. Presenta evidencias de desvitrificación, ya sea por envejecimiento o por su exposición a un medio agresivo, procesos que aumentan considerablemente su fragilidad. La fibra de vidrio, es uno de los materiales más usados en la actualidad y el reemplazante más difundido de los asbestos.

El otro material analizado posee características fibrosas, elásticas y presenta resistencia al momento de la molienda. Se ubica en placas de 1 a 1,5 cm de espesor, con ambas superficies selladas con pintura o materiales de revestimiento de coloración gris. Las fibras que componen la placa fueron separadas y analizadas con microscopio óptico determinándose su anisotropía y la extinción levemente oblicua (menor a 5°). Se disponen en haces de fibras extensas, con sus puntas desarmadas

generando un desmenuzamiento en otras de menor tamaño (Figura 14A). Son muy abundantes, de muy baja densidad, volátiles y no superan los 60 µm de largo y 8 µm de ancho. Por difracción de rayos X, se determinó como grunerita, con sus reflexiones mayores en 8,33, 2,77, 3,07 y 2,63 Å, comparables con la ficha ICDD 31-631 (ICDD, 1993) (Figura 14B). Este mineral pertenece a una serie isomorfa de anfíboles. Sus extremos se denominan cummingtonita ((Mg,Fe)₇Si₈O₂₂(OH)₂) y grunerita (Fe₇Si₈O₂₂(OH)₂). La amosita es el nombre comercial de la variedad mineralógica de asbesto grunerita correspondiente a las iniciales de Asbestos Mines of South Africa. Se presenta en forma de fibras rectas y no es muy adecuada para hilado debido a su dureza y fragilidad. Es resistente a los ácidos y al calor, y se utiliza como aislante. Después del crisotilo, la amosita fue el segundo asbesto más común usado en productos comerciales y su mayor productor fue África. Su uso ha disminuido en gran parte desde que fue demostrada su peligrosidad.

Por microscopía electrónica de barrido se pudo reconocer la morfología típica de los anfíboles asbestiformes. La Figura 15A muestra la morfología de los cristales anfibólicos. Son fibras finas, rectas y rígidas, sus extremos se encuentran fracturados y/o desmenuzados. Este hábito es extremadamente peligroso ya que, al inhalar las agujas de anfíboles, especialmente las más cortas y rígidas, alcanzan los espacios bronquioloalveolares con mayor facilidad que las fibras curvadas de crisotilo, y llegan a las vías respiratorias generando enfermedades pulmonares. En la superficie de las fibras se reconocieron impurezas del material que compone la placa aislante. El análisis de EDS, permitió identificar Si, Mg, O, y Fe, confirmando la composición de este anfíbol-asbesto (Figura 15B).

Revestimiento aislante de un caño del exterior del edificio:

La muestra se obtuvo del revestimiento (aislación) de un caño de aproximadamente 5" ubicado en el patio, en el sector oeste del predio, próximo a una pared medianera (Figura 16A). Se presenta como un fieltro, con una débil protección externa de yeso, muy deleznable y fácilmente liberado al ambiente exógeno con posibilidades de ser dispersado por el viento. En el cuadro se observa un detalle las fibras expuestas.

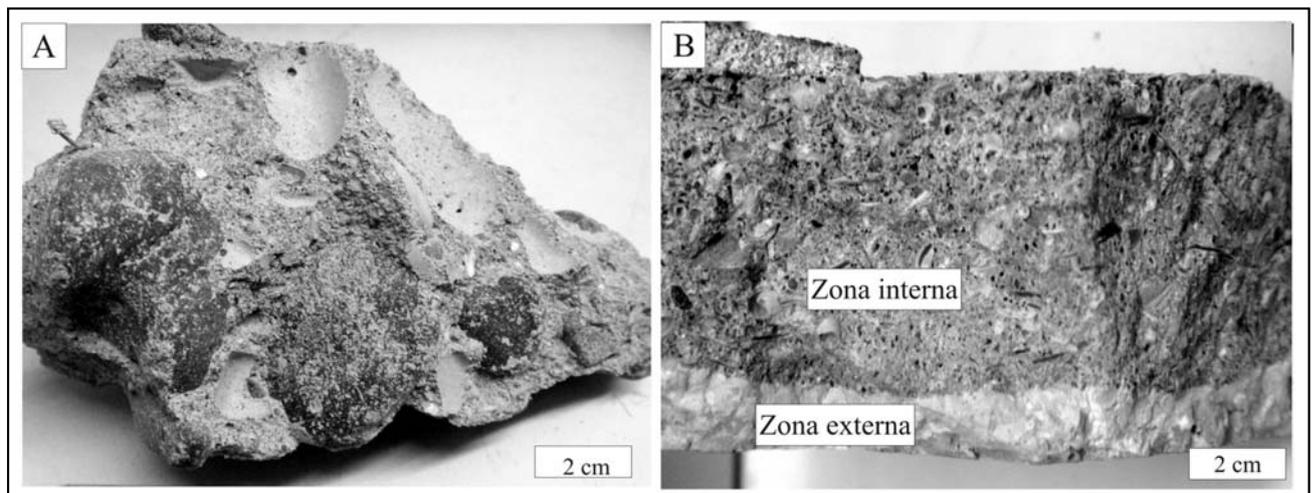


Figura 12. A. Hormigón con clastos de canto rodado de composición volcánica, de tamaños destacables. B. Contacto entre las dos zonas del material de los zócalos.

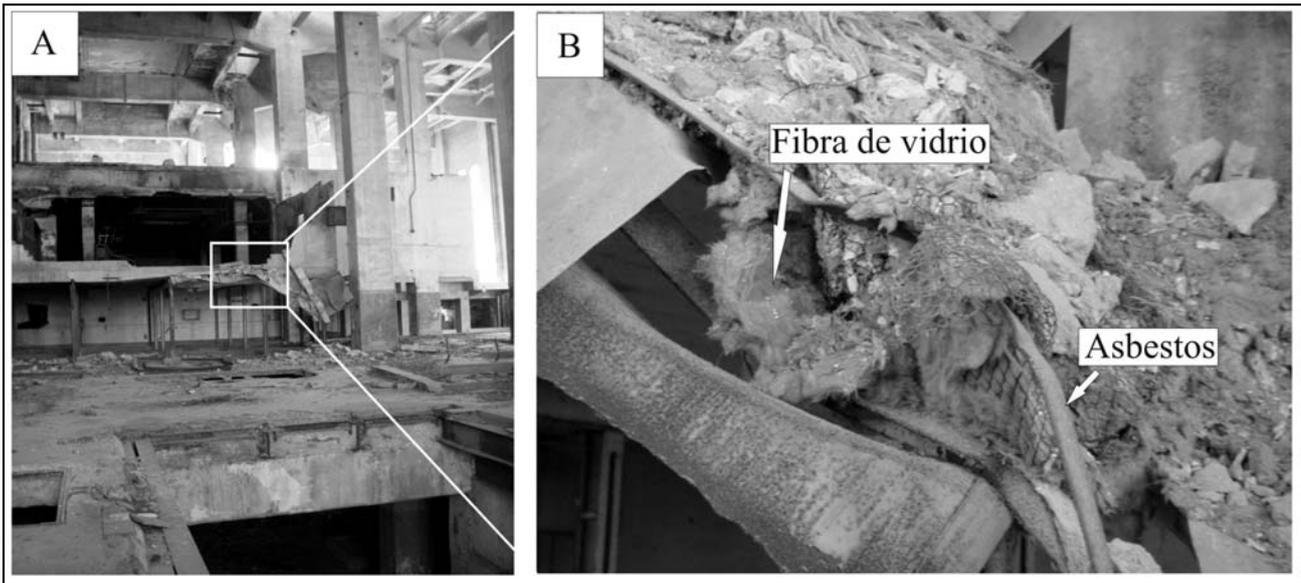


Figura 13. A. Cielorraso caído en la planta alta del edificio. B. Detalle del techo, donde se observa los materiales aislantes fibrosos.

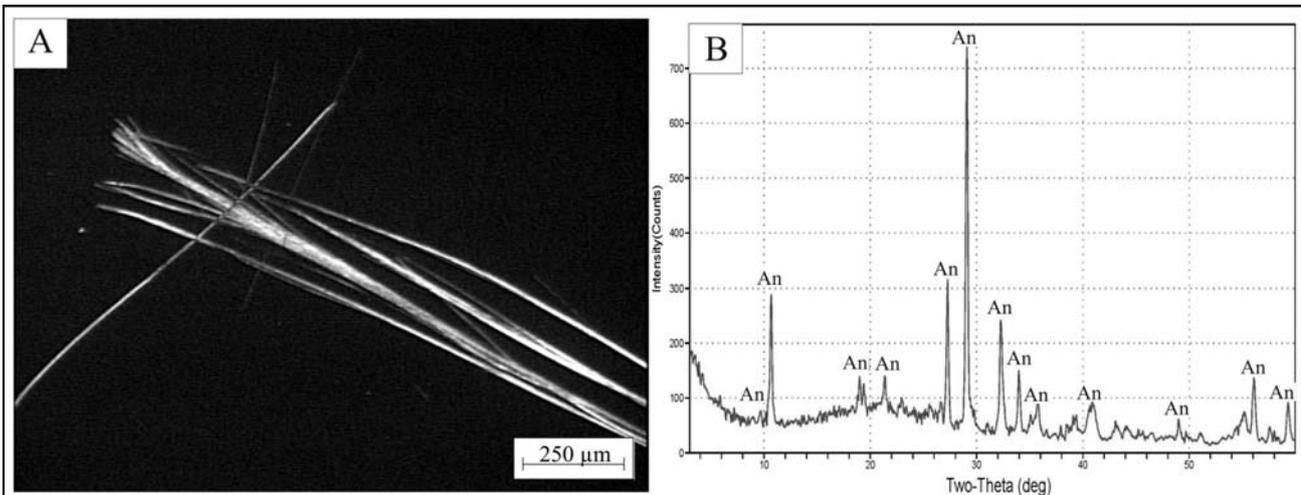


Figura 14. A. Fibras birrefringentes, extensas y flexibles. B. DRX del material fibroso del techo (An: anfíbol).

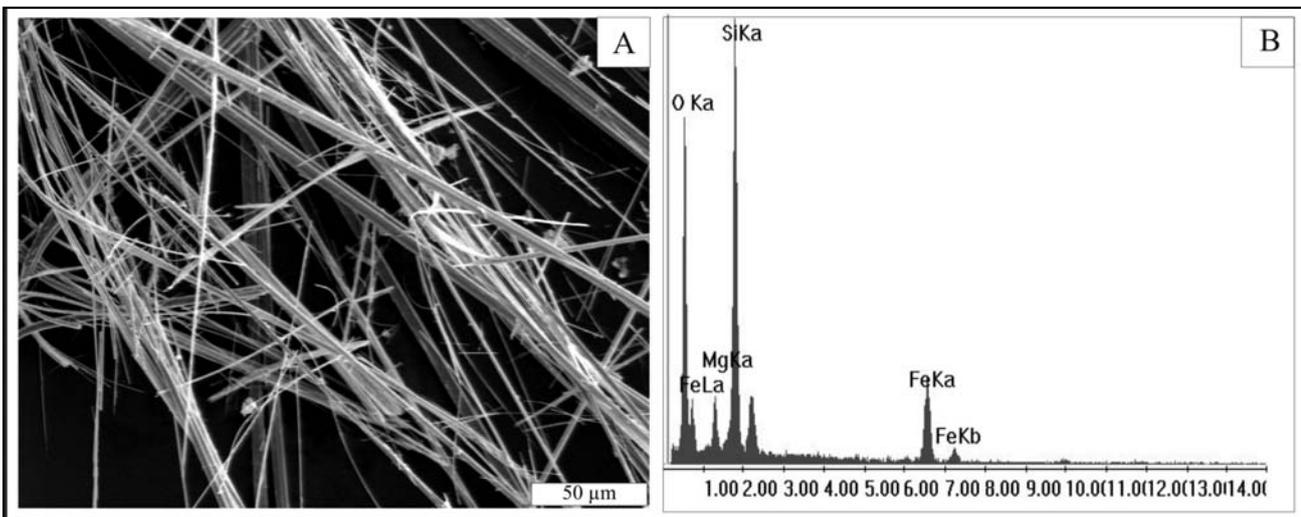


Figura 15. A. Fibras rectas y rígidas. B. EDS de las fibras de anfíboles.

Este material fibroso presenta una coloración gris a levemente verdosa, es blando, flexible y resistente a la molienda. Los paquetes de fibras llegan a medir 4 cm de largo, están integrados por numerosas fibras contenidas en una masa del mismo material, pero totalmente desordenadas. Es un material extremadamente liviano y arrancado y llevado con facilidad por el viento. Teniendo en cuenta estas características, se considera muy nocivo a efectos ambientales, por ser fácilmente movilizado, dispersado e incorporado al material particulado en suspensión.

Bajo microscopio óptico es anisótropo, de bajo color de interferencia (gris a levemente amarillo de primer orden) y con extinción oblicua, entre 2 y 8°.

Por difracción de rayos X, se determinó como un mineral del grupo de los anfíboles. Por la estructura, corresponde a grunerita, con sus mayores intensidades en 8,33, 2,77, 3,07 y 2,63 Å, comparables con la ficha ICDD 31-631 (ICDD, 1993) (Figura 16B). Además se reconocieron reflexiones menos intensas de cuarzo.

Las fibras observadas con microscopio electrónico de barrido, presentan hábito acicular característico de los anfíboles-asbestos (Figura 17A). Las dimensiones son variables, aunque predominan las fibras largas. Los extremos poseen una terminación, en algunos casos, en punta astillosa. Las fibras menores son producto del desprendimiento de otras mayores, generando hábitos asbestiformes y fibras quebradizas. En algunos casos se destaca su terminación tipo aguja. El análisis de EDS permitió identificar Si, Mg, O y en menor proporción Fe (Figura 17B).

Revestimiento de caños del interior del edificio

En el interior del edificio existen algunos caños revestidos con materiales fibrosos. Se localizan en la planta baja de la usina y se conectan hacia la parte superior. Están cortados y aún conservan el material fibroso que los recubría (Figura 18A).

Por difracción de rayos X, se determinó que la composición es similar a la del recubrimiento del caño exterior. Se reconocen las reflexiones de anfíboles (amosita), de muy buena cristalinidad, con valores en 8,37 y 3,07 Å, cuarzo y talco. Este último se observa en el material adherido a las fibras. Bajo

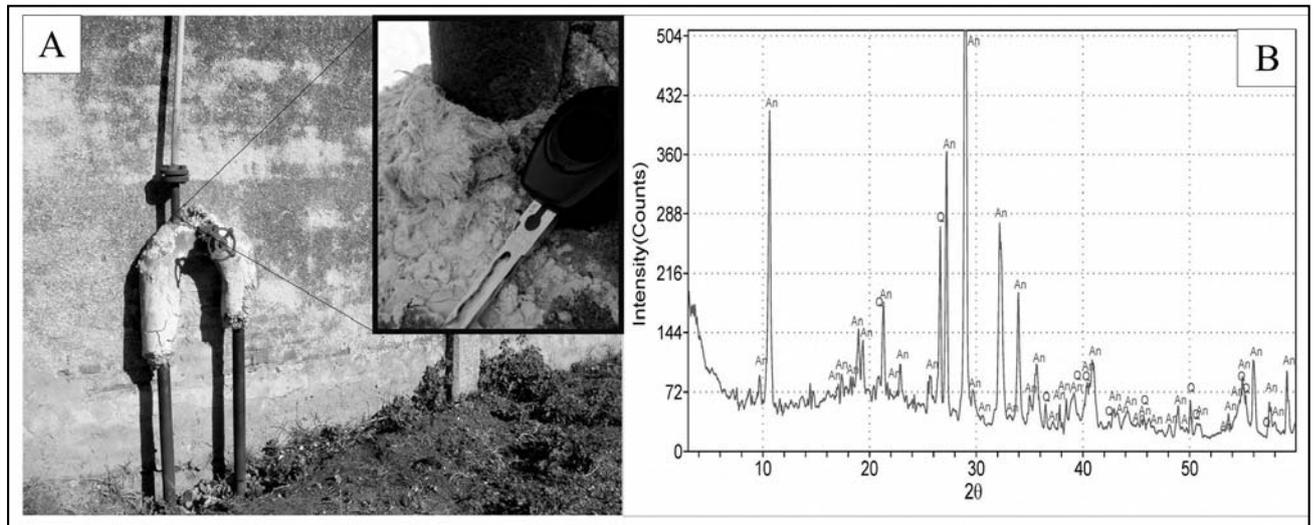


Figura 16. A. Caño exterior revestido con asbesto. Detalle del material fibroso. B. DRX del material aislante (An: anfíbol, Q: cuarzo).

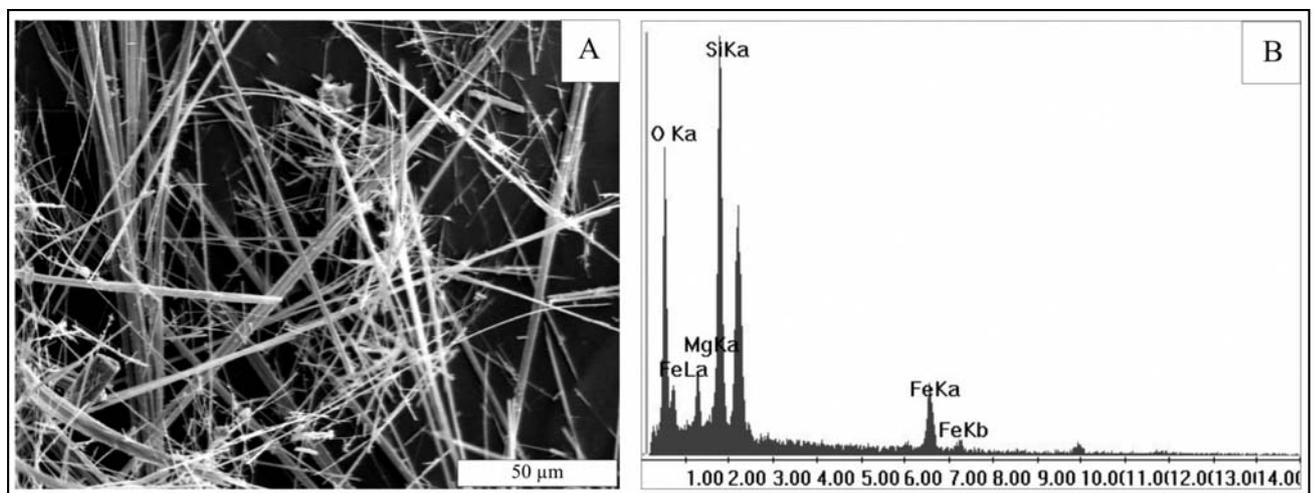


Figura 17. A. SEM de las fibras del recubrimiento externo. B. Espectro EDS.

microscopio petrográfico las fibras presentan las mismas propiedades ópticas que la muestra anterior, y se reconocen impurezas de cuarzo, óxidos de hierro y talco. Además, puede observarse una malla de alambre galvanizado usado para contener el material aislante y una delgada capa de yeso que le otorga terminación.

Al SEM, los cristales presentan morfología asbestiforme, similar a la mencionada en la muestra anterior. En la Figura 19A, se observa las terminaciones de los paquetes de fibras y como de una misma se separan otras de menor espesor, la morfología es fibrosa y acicular. Entre éstas, hay impurezas de talco y material del producto cementante. Las fibras, son rígidas y extensas, las más largas son flexibles. El análisis de EDS permitió identificar Si, Mg, O, y Fe (Figura 19B).

CONCLUSIONES

1. En la construcción del edificio de la ex usina de Ingeniero White se utilizaron materiales asbestiformes claramente identificables. Estos pueden ser evaluados

con absoluta seguridad, determinar su calidad, cantidad y ubicar los sectores que los contienen.

2. Se identificaron asbestos como aislante de tuberías, en chapas de cerramientos de techos y en la pintura asfáltica del recubrimiento de columnas. Si bien el contenido de crisotilo en esta última es prácticamente despreciable, debe ser tenido en cuenta.
3. Los materiales analizados que contienen asbestos fueron debidamente ubicados dentro del edificio y determinada su composición por métodos analíticos que no dejaron dudas acerca de su identificación entre los que pueden mencionarse microscopía óptica y electrónica, difracción de rayos X y SEM-EDS.
4. Se determinaron dos diferentes tipos de asbesto: crisotilo (del grupo de la serpentina) y amosita (del grupo de los anfíboles). El primero fue identificado en las placas de fibrocemento. Los fragmentos se hallan esparcidos por todo el edificio de la usina y aun quedan relictos en su sitio original.

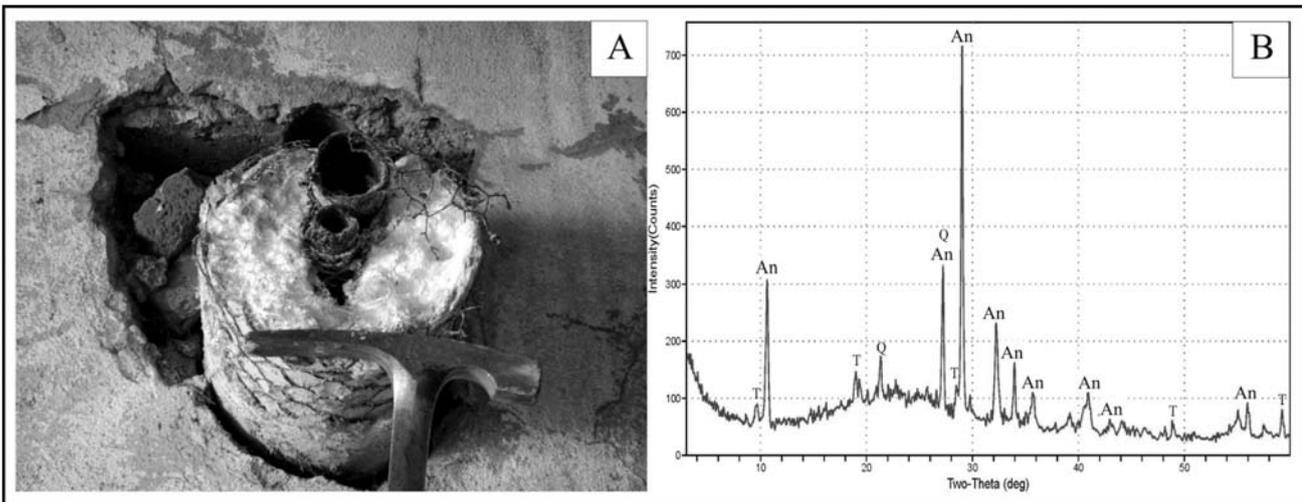


Figura 18. A. Caño truncado recubierto de material fibroso. B. DRX del material fibroso (An: anfíbol, T: talco, Q: cuarzo).

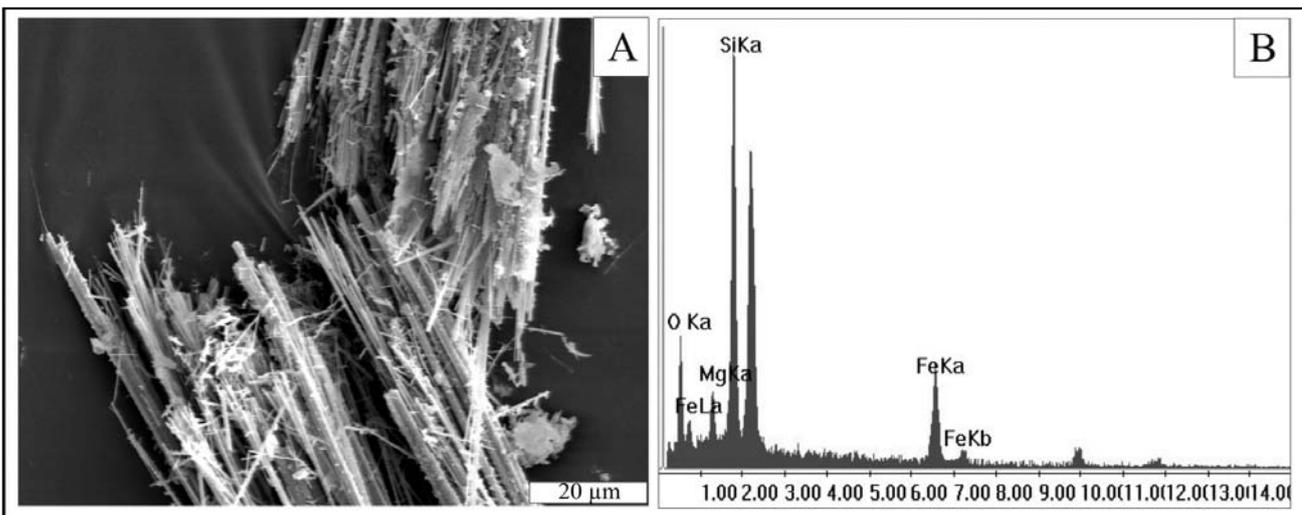


Figura 19. A. Morfología de las fibras de anfíboles (SEM). B. EDS de las fibras.

5. A partir de los estudios sobre secciones delgadas de las chapas de fibrocemento se puede concluir que existió un lavado del material que estuvo expuesto a las condiciones exógenas y a partir de esto las fibras quedaron sin adherencia y se dispersaron con facilidad.
6. Estos materiales, al ser movilizados para su disposición final, en una etapa de recuperación del edificio, podrían generar un problema ambiental de magnitud. Por otro lado, el material asbestiforme contenido, dentro de las placas, se encuentra prácticamente inmovilizado en la losa por los materiales cementíceos y no se liberarán al medio ambiente con facilidad.
7. Los materiales fibrosos que recubren los caños constituyen un problema muy serio ya que además de poseer en su composición cristales de anfíboles aglutinados y poco protegidos del ambiente, son altamente dañinos para la salud humana, ya que fácilmente se volatilizan, disminuyen constantemente de tamaño, están fragilizados por el tiempo transcurrido desde su utilización y son dispersados principalmente por el viento.
8. Este edificio se encuentra ubicado en una zona poblada y de circulación constante de personas ya que está localizado en un sector fabril y portuario muy importante. Para la puesta en valor del edificio, deberá tenerse una idea acabada de la composición de los materiales y su distribución, cuáles son los materiales que contienen asbestos, determinar su disposición final y mitigar los efectos nocivos ambientales que provocarán.
9. Para desarrollar un emprendimiento que concluya con la puesta en valor de una obra arquitectónica como esta, será necesario tomar todas las precauciones que eviten problemas ambientales por la movilización, transporte y disposición final de los materiales que contienen a los asbestos.
10. Un estudio detallado de los materiales que se utilizaron en la construcción del edificio de la usina, permitirá definir un plan de remodelación, en el que se consideren todas las variables, poniendo especial cuidado en los problemas que pueden ocasionar los asbestos y llevarlo a su fin, para habilitar una obra arquitectónica única en esta ciudad, manteniendo el estilo original.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dpto. de Geología de la UNS, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Bs. As., al INGEOSUR-CONICET, a la Municipalidad de Bahía Blanca, al Museo Ferro White por el apoyo brindado.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- BATTISTA R., SPELTINI C., CHOREN H., SOTA J., CARRIZO E., 2006.
Reciclado de residuos conteniendo asbestos. Transformación de fibras de asbestos por sinterizado en matriz cerámica. Reciclado de residuos de construcción y demolición (RCD) y de residuos de procesos (RP).
PROCQMA-U.T.N, San Rafael, Mendoza. ISBN 950-42-0056-7.
- INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (ICDD) 1986.
Mineral Powder Diffraction File.
Data book: 228-229, Swarthmore, Pennsylvania, U.S.A.
- INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA (ICDD) 1993.
Mineral powder diffraction file. Databook, Park Lane.
Swarthmore, Pennsylvania. 2389 pp.
- LUIS, G., HERNÁNDEZ C., RUBIO C., FRÍAS I., GUTIÉRREZ A., HARDISSON A., 2009.
Toxicología del asbesto.
Cuadernos de Medicina Forense, 57- 207-213.
- RODRÍGUEZ, E. J., 2004.
Prohibición del asbesto en Argentina.
RETEL (Revista de Toxicología en línea) N° 6.
- ZOLTAI, T., 1981.
Amphibole asbestos mineralogy. Chap. 5
in Veblen, D., ed., Amphiboles and other hydrous pyriboles, Rev. in Mineralogy, Mineralogical Soc. of America, v. 9A, 237-278.



Consecuencias de la configuración antrópica de la costa de la ciudad de Buenos Aires

Consequences of the anthropic coastal configuration of Buenos Aires city

López, Rubén A. ¹ ✉ - Marcomini, Silvia C. ¹

Recibido: 03 de Agosto de 2012 • Aceptado: 26 de Mayo de 2013

Resumen

La totalidad de costa de la Ciudad de Buenos Aires presenta características artificiales, debido a las modificaciones que progresivamente se vienen realizando históricamente. La construcción de defensas y rellenos artificiales fueron las principales tareas que se llevaron adelante para desdibujar y sepultar el paisaje costero original.

Para la fijación de la línea de costa se utilizaron distintas obras, pero todas vinculadas al acorazamiento como clase funcional de manejo, donde se destacan los paredones verticales, inclinados y piedraplenes de bloques y escombros. Asociado a la estabilización de la línea de costa se trabajó con tareas de relleno para elevar las cotas del territorio ganado al Río.

Los paredones verticales son las estructuras de mayor distribución a lo largo de la costa de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Estas estructuras se caracterizan por presentar altos valores de reflectividad que aminoran la capacidad de formación de depósitos de playa al frente. El análisis del comportamiento de los paredones verticales con las distintas condiciones de los niveles de las aguas del estuario permitió determinar que durante los periodos de tormentas (fundamentalmente sudestadas) las estructuras están sometidas a fenómenos intensos de reflexión y sobrelevado, y a fenómenos de socavamiento de la base durante las bajantes extraordinarias

Los paredones inclinados presentan mejores condiciones para disipar los trenes de olas incidentes por refracción, disminuyendo el poder erosivo del oleaje y el fenómeno de reflexión.

La aplicación de bloques al pie de las estructuras de acorazamiento (paredones verticales e inclinados), aportan una mejor respuesta para mitigar fenómenos reflectivos y de socavamiento, dando mayor eficiencia en la disipación de la energía de ola.

Los materiales utilizados en los rellenos tienen su proveniencia, fundamentalmente, en las demoliciones de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y la extracción de suelos de los túneles de tendidos de redes de subterráneos y excavaciones de edificios. En otros casos se utilizó material limo arenoso proveniente del refulado del lecho del estuario.

En los sectores de costa donde se da la interacción entre la dinámica costera del estuario y el material aportado por los rellenos, el medio tiende a desarrollar playas.

1. Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires

✉ rlopez@gl.fcen.uba.ar

Es indispensable programar un manejo racional de la costa de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, determinando una línea de costa "definitiva" planificada entre la Ciudad de Buenos Aires y los Municipios del conurbano: San Isidro, Vicente López, Avellaneda y Quilmes, entendiéndose por definitiva, que la configuración proyectada no sufra cambios por rellenos futuros que no sean los propios producidos por la dinámica del estuario del Río de la Plata.

Plabras clave: *Costa de la Ciudad de Buenos Aires, defensa de costas, estuario del Río de la Plata, ecosistemas costeros*

Abstract

The coast of Buenos Aires presents artificial features due to changes that have taken place progressively from historical times. The construction of defenses and artificial landfills carried out, blurred and buried the original coastal scenery. Individual works were used for fixing the coastline. All of them linked to armoring, as functional class of management, highlighting vertical seawalls, sloping debris and block piedraplens.

In addition to shoreline stabilization, filling tasks were performed to risethe territory won to the estuary.

Vertical seawalls are the most widely distributed along the coast of Buenos Aires city. These structures are highly wave reflectives reducing beach deposits on the front. The analysis of the behavior of vertical walls under different fluctuation of the water levels in the estuary revealed that during the storm periods (sudestadas) structures are subjected to intense phenomena of reflection and overwash. Conversely, during extreme lows, wave action undermining the base of the structure.

Sloping walls dissipate incident wave trains by refraction, reducing the erosive power of the waves and the phenomenon of reflection.

The placement of blocks at the foot of armoring structures (vertical and inclined walls), provide a better response to mitigate wave reflection and undermining phenomena, giving greater efficiency in dissipating wave energy.

The materials used for fillings come mainly from demolition and soil removal of underground tunnels construction, cable network and building excavations. In other cases the material for filling comes from dredging estuary bottom and is a silty sand.

In coastal areas where there is an interaction between estuarine coastal dynamics and material provided by the fillings, beaches tend to develop.

It is essential to set a rational management of the coast of Buenos Aires city, determining 'definitive' shoreline planned and designed together between Buenos Aires city and neighboring municipalities, including: San Isidro, Vicente López, Avellaneda and Quilmes.

Final configuration is understood as a definitive waterfront that will have no artificial landfills in the future and their configuration changes will be only associated to the natural dynamics of the estuary of the Río de la Plata

Keywords: *coast of Buenos Aires City, coastal defense, Río de la Plata estuary, coastal ecosystems.*

LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS HIDRODINÁMICAS Y GEOLÓGICAS

La costa de la Ciudad de Buenos Aires está emplazada en el margen sur del estuario del Río de la Plata, a unos 50 km del frente del delta del Paraná (Figura 1). El delta del Paraná constituye un delta altamente constructivo, con rangos de avance del frente del orden de los 50 a 70 m por año (Soldano, 1947, Codignotto y Marcomini, 1993). La descarga anual de sedimentos del río Paraná fue estimada en 150 millones de toneladas anuales (Soldano, 1947), las cuales son en parte ingresadas al sistema estuarial e incorporadas a la dinámica litoral. Los sedimentos aportados son en general limo arcillo arenosos y se incorporan al sistema como transporte por suspensión y en menor medida por saltación.

El estuario del Río de la Plata presenta una variabilidad muy grande en el nivel de sus aguas, lo cual regula las condiciones hidrodinámicas y en consecuencia el transporte de sedimentos. Los datos históricos del nivel del río de la Plata para el Puerto de Buenos Aires muestran que el mismo presenta fluctuaciones que van desde ascensos de 4,40 m a descensos de -1,97 m durante eventos extraordinarios y entre 3,00 m y -0,80 m durante eventos ordinarios, (Pereyra et al. 2001).

Los 200 km² de superficie que posee la Ciudad de Buenos Aires se desarrollan sobre una planicie loésica con bajo relieve relativo, labrado por cursos de poca profundidad e interfluvios romos que le dan un aspecto mesetiforme.

Son pocos los lugares que posibilitan reconocer las unidades que constituyen su subsuelo inmediato. La estratigrafía de la Ciudad se estudio fundamentalmente por medio de perforaciones, reconociéndose un basamento cristalino y por encima, en discordancia, sedimentitas del Terciario y Cuaternario. Este basamento cristalino está compuesto por rocas metamórficas, al que se le asignó una edad de >2.085 millones de años, corresponde al Proterozoico (Dalla Salda, 1981).

Por encima del basamento cristalino, y tras un gran hiatus, tuvo lugar la depositación de secuencias principalmente continentales (eólicas, loessicas y fluviales) y marinas (en diferentes facies), correspondientes a las formaciones Olivos (Oligoceno Superior), Paraná (Mioceno Superior a medio) y Puelches (Pliopleistoceno), (Pereyra et al. 2001).

Sobrepuestas a las mencionadas arenas Puelches se disponen las sedimentitas que constituyen el "Pampeano" y "Post Pampeano" de Ameghino (1880), que representan unidades aflorantes dentro del territorio en la Ciudad de Buenos Aires,



Figura 1. Mapa de Ubicación. La línea punteada indica aproximadamente la posición de la paleocosta.

representando los últimos 30 a 40 metros culminantes de la sucesión estratigráfica. Los Sedimentos Pampeanos están compuestos en su parte inferior por la Formación Ensenada o Ensenadense (Pleistoceno inferior) y la parte superior por la Formación Buenos Aires o Bonaerense (Pleistoceno superior). Los Sedimentos Pampeanos ocupan los sectores más altos de la Ciudad, conocida geomorfológicamente como Terraza Alta (Yrigoyen, 1993), en el sector costero se los puede reconocer en las barrancas Parque Lezama, Belgrano y Núñez, que conforman el paleocantilado cuya plataforma de abrasión afloraba a lo largo de toda la costa de la Ciudad y hoy se encuentra cubierto por rellenos en su totalidad. Estas formaciones son depósitos loessicos compuestas por limos castaños con predominio de materiales de origen volcánico y fragmentos líticos de rocas volcánicas y pumiceas, con presencia de calcretes en la parte superior. Es muy difícil su diferenciación entre estas dos formaciones, pero el Ensenadense presenta mayores concentraciones de $\text{CO}_3 \text{Ca}$, que lo hace más apto para las fundaciones y el Bonaerense más contenido de arena. Los sedimentos Pampeanos actúan como un acuífero de baja o media productividad componiendo en su sección saturada el Acuífero Pampeano (Auge, 1990 y 2006). La sección inferior (Ensenadense basal) actúa como acuífero. Su importancia radica en ser la vía para la recarga y la descarga del Acuífero Puelche.

Los Sedimentos Postpampeanos se encuentran en el subsuelo de la ciudad, en el relieve labrado en el Pampeano, a cotas casi equivalentes al actual nivel de las aguas del estuario, razón por la que sus afloramientos resultan frecuentes en el fondo de los valles profundos actuales y a veces también integran prácticamente los terrenos de coberturas actuales en zonas más elevadas. Están representados en la base por la denominada Formación Luján, un sedimento fluvial y lacustre, limos arcillosos relativamente plásticos, que se extienden en las cuencas fluviales a lo largo de los márgenes. La edad de esta unidad ha sido considerada entre los 28.000 y 8.000 años (Rimoldi, 2001). La Formación Querandí es el resultado de la ingresión de las aguas atlánticas, que penetraron profundamente en el ámbito bonaerense, por los grandes cauces: Matanzas-Riachuelo hasta

la localidad de Morón y en el Reconquista hasta Puente Márquez. Esta ingresión tuvo el suficiente alcance como para labrar la plataforma de abrasión (terrazza baja de Yrigoyen, 1993). Sobre la plataforma se depositaron los sedimentos de la ingresión de la Formación Querandí. Se trata de depósitos de limos plásticos, conchiles, característicos por su coloración gris verdusco a negros, son típicos depósitos de playa sobre todo en la zona marginal del Plata. Los restos fósiles de esta unidad han registrado una antigüedad de 6.000 años. Estos limos son hidroplásticos cuya humedad natural supera en mucho la del límite líquido dando lugar a barros cuya capacidad soporte es prácticamente exigua a nula. Los sedimentos postpampeanos, por su variada composición, pueden actuar tanto como acuitardos o acuíferos, en la planicie estuárica.

Las características morfológicas originales de la costa, las barrancas, la sinuosidad del Riachuelo, los desagües naturales de sus arroyos, sus costas recortadas, la playa, las lagunas y bajos anegados, se hallan totalmente modificadas por la acción antrópica (Marcomini y López, 2004). Fueron modificadas las pendientes de las barrancas para facilitar su circulación y sólo se pueden observar sus características originales en lugares puntuales de la ciudad como ser parque Lezama, Plaza San Martín, y al norte del barrio de Belgrano. El Riachuelo fue canalizado y rectificado en distintos sectores de su curso, su planicie de inundación fue parcialmente ocupada. A los arroyos Medrano, Vega, White, Maldonado, Manso, Tercero del Medio y Tercero del Sur, se les modificaron las características de sus hábitos originales y fueron entubados (Holocwan, 1996)

Los rasgos geomorfológicos reconocidos en el sector litoral responden a las características propias de una costa de acumulación estuárica, dominada por la presencia de una bidireccionalidad en las corrientes litorales dependiente de las condiciones climáticas que afectan el estuario. Se identifica una corriente principal hacia el sudeste, caracterizada por el transporte de sedimentos en suspensión limo arcillosos, altamente influenciada por la progradación del delta del Paraná. Otra corriente episódica con sentido hacia el noroeste, se hace presente durante tormentas (sudestadas) y se caracteriza por un transporte

de sedimentos por tracción-saltación encontrándose la suspensión subordinada. Esta corriente se la podría denominar deriva litoral, aunque cabe destacar que no corresponde a una acción constante del oleaje sino al transporte asociado a tormentas (Marcomini y López 2004). En la hidrodinámica costera del estuario es importante resaltar la diferencia existente en el transporte entre las corrientes provenientes del noroeste y sudeste, ya que es un factor fundamental a tener en cuenta en la estimación de la cantidad y granulometría de los sedimentos depositados en las inmediaciones de las estructuras de protección de costa (López y Marcomini, 1995).

METODOLOGÍA

La metodología empleada consistió en el análisis morfológico de la zona costera de la ciudad de Buenos Aires para distintos años de observación, lo que permitió diferenciar los cambios efectuados por el hombre de aquellos producidos por los procesos hidrodinámicos costeros. Dichas observaciones se efectuaron sobre la base de fotos aéreas correspondientes a los siguientes años:

1964 en escala 1:50.000, Servicio Hidrografía Naval Año.

1991 en escala 1:40.000, Servicio Hidrografía Naval Año.

1998 en escala 1:15.000 Instituto Geográfico Militar.

Asimismo se evaluaron las características hidrodinámicas del sector costero, mediante el análisis de los ascensos máximos anuales y mensuales en el nivel del río de la Plata. La incidencia del viento en el nivel del río se evaluó mediante una recopilación que compiló datos del nivel del río, dirección y frecuencia de vientos a partir de datos diarios tomados a las 8 de la mañana en la estación Puerto Buenos Aires (Servicio Meteorológico Nacional). Se realizó el relevamiento y caracterización de todas las estructuras costeras de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, se clasificaron y se confeccionó un mapa de estructuras costeras. Se analizó el comportamiento de las mismas en distintas condiciones energéticas del estuario (Durante sudestadas y bajantes extraordinarias), con observaciones de campo y se generaron modelos de comportamiento. También se estudiaron la conformación de los depósitos de playa según el tipo de defensa asociada y la respuesta de los materiales aportados por lo rellenos a la acción de la dinámica costera.

HISTORIA DE LAS MODIFICACIONES COSTERAS

Las modificaciones costeras, desde la fundación de Buenos Aires a la fecha, que reflejan necesidades e intereses políticos, económicos, defensa y estratégicos de una sociedad cambiante y en continua evolución.

La primer acción de acorazamiento reconocida en la costa de la antigua Ciudad de Buenos Aires, esta relacionada con la necesidad de defender a la ciudad contra posibles ataques de corsarios, es así como en 1594 se inician tareas precarias de fortificación de las primeras instalaciones que se asentaban en la saliente del paleoacantilado, construyendo un muro circundante de adobe. Con el transcurso del tiempo, el edificio amenazaba derrumbarse, mientras persistía el peligro de un ataque por parte de naves enemigas, por lo que entre 1666 y 1670 se construyó un fuerte, con foso circundante. Y entre 1720 y 1730 se realizan trabajos de refacción, con importantes obras defensivas sobre la ribera del Plata (Figura 2), donde podían atacar naves enemigas, que eran mucho más importantes que las orientadas hacia la ciudad.

La primer acción de relleno artificial y de avance sobre la costa del Río de la Plata data de 1757, motivada por la necesidad de la crear un paseo público, denominado paseo de la Alameda (Berjman, 2001), ya que el único espacio de encuentro social de la época era la plaza la Plaza Mayor. También cumplía con la función de evitar las inundaciones durante las crecientes del río.

En 1804 el virrey Sobremonte lo extendió hasta la calle Sarmiento y en 1844 mando a construir un muro en su frente conocido como "muro de la Alameda"

La actividad portuaria, a fines del siglo XVIII, se transforma en el motor principal de la economía del Río de la Plata. En 1853 se demuele el fuerte y en 1855 se construye la "Aduana Nueva o Taylor", con un muelle de pasajeros, en el entonces denominado Bajo de la Merced, entre las actuales calles Bartolomé Mitre y Perón. Las condiciones operativas de desembarco eran muy precarias lo que llevo a pensar la necesidad de contar con obras de acceso de embarcaciones más eficientes, esta discusión duró más de 30 años, hasta que en 1883 se aprueba la construcción del puerto de Buenos Aires con el proyecto presentado por el Ingeniero Madero. La construcción se desarrollo entre 1887 y 1897, el diseño presentaba dos canales, uno al sur y otro al norte, que saliendo del canal principal del Río de la Plata definían dos dársenas de acceso a la entrada de cada canal. Entre las dársenas y ocupando todo el frente urbano se ubicaban cuatro diques interconectados entre sí. Durante este periodo, de construcción de Puerto Madero, quedan sepultan las morfologías naturales originarias de la costa del centro de la Ciudad de Buenos Aires y la ciudad queda separada del río (Marcomini y López 2011).

Otra actividad que modificó sustancialmente la fisonomía de la costa de la ciudad de Buenos Aires fue la construcción de vías de ferrocarril. En 1860 las primeras vías se instalaron sobre las playas del estuario sobre pilotes. Pero posteriormente los tendidos hacia el norte de la ciudad se realizaron relleno y sobreelevando las vías a cota de 5m y construyendo un muro perimetral de defensa sobre la costa. Es así como tuvo su origen el Ferrocarril del Norte de Buenos Aires, con la construcción de una línea desde la Aduana Nueva (Paseo Colón y Victoria) hasta el oeste de la Usina de Gas (Retiro) y por el río hasta el canal de San Fernando. La línea Belgrano en 1863 llegó a San Isidro y en 1865 a Tigre.

A principios del siglo XX otra actividad motoriza la modificación de la línea de costa, la recreación. Es así como para generar nuevas áreas de esparcimiento se crean los balnearios Municipales de la Costanera Sur y Costanera Norte, con importantes obras de acorazamiento compuestas por paredones verticales.

Entre 1964 y 1991 se realizan las tareas de relleno que generaron las mayores superficies a expensas del desplazamiento de la línea de costa, correspondientes fundamentalmente al sector de Costanera Sur (actual Reserva Ecológica, la ex ciudad Deportiva de Boca) y Costanera Norte (Costa Salguero, Punta Carrasco y Ciudad Universitaria) (Marcomini y López 2006). Las tareas de relleno no sólo cambiaron la topografía y morfología de la costa sino que también su configuración. La técnica de relleno utilizada en esta etapa se baso en la construcción de albardones, para generar recintos, que posteriormente eran rellenados por material refulado desde el lecho del río. Es así como se generaron sistemas de lagunas cerrados y semicerrados, que en muchos casos fueron abandonados (Reserva Ecológica Costanera Sur), que debido a las altas tasas de depositación,



Figura 2. The Castle at Buenos Aires, and the Beach beneath, Acuarela de Emeric Essex Vidal, 1816. Acorazamiento del frente del Fuerte Buenos Aires.

la amplia disponibilidad de especies aportadas por el río Paraná, las condiciones climáticas y el ambiente estuarial favorecieron la generación de nuevos ecosistemas a corto plazo (10 a 20 años) (Marcomini y López, 2004).

En la actualidad continúan los avances sobre la costa del estuario, pero de menor magnitud, con emprendimientos como Parque de los Niños, Parque de la Memoria, etc.

CARACTERÍSTICAS DE LA LÍNEA DE COSTA ACTUAL

La estabilización de la totalidad de la línea de costa de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires se ha logrado mediante distintas metodologías (figuras 3 A y B), entre las que se pueden diferenciar las programadas mediante diseños *ingenieriles* y las estabilizaciones con material de relleno (*sin diseño ingenieril*), (figura 4).

Con diseño ingenieril

Los diseños ingenieriles corresponden a estructuras de acorazamiento (Lopez y Marcomini, 2002), se pueden dividir en 2 grupos, los *paredones verticales* y los *paredones inclinados*.

Los *paredones verticales* se hallan conformados en su mayor parte por hormigón y/o planchas metálicas. Este tipo de estructuras ocupan la mayor extensión a lo largo de la costa (Figura 3 A y B, mapas de estructuras costeras). Se los encuentra en el

frente de todas las instalaciones del puerto y dársenas, la Costanera Norte y el frente del Parque de los Niños. Estas estructuras se caracterizan por presentar altos valores de reflectividad frente al embate del oleaje (Figura 5A).

La interacción de estas estructuras con la hidrodinámica litoral está regulada fundamentalmente por el nivel del río. La acción reflectiva es máxima durante los períodos de tormentas con ascenso del nivel del río (Sudestadas), para los casos en los que el nivel del río supera la altura de la estructura, es factible que se produzcan fenómenos de erosión en el sector posterior, por sobre lavado (Figura 5B).

Durante los períodos de bajantes extraordinarias, el oleaje afecta la base de estas estructuras produciendo socavamiento y provocando su desestabilización y/u otros deterioros de las estructuras (Figura 5C).

Por tal motivo son más convenientes las estructuras combinadas con bloques al pie ya que disminuyen el fenómeno de socavamiento por disipación de la ola incidente (Figura 4).

Los paredones verticales aminoran la capacidad de formación de depósitos naturales al frente (playa), debido a la alta reflexión de olas. Estas estructuras representan una discontinuidad en el perfil costero, que además interrumpe la accesibilidad entre el sector urbano y la playa del estuario, por la diferencia de cota existente, entre el tope del paredón y el nivel medio del río.

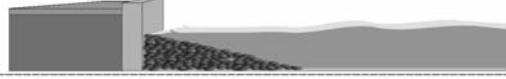
Clase	Tipo de estabilización del frente costero	Subtipo	
Diseños ingenieriles	Paredones verticales	Simples	
		Con bloques al pie	
	Paredones inclinados	Simples	
		Con paredón vertical al pie	
		Con bloques al pie	
		Con paredón vertical y bloques al pie	
Con calle y paredón vertical al pie			
Sin diseños ingenieriles	Frente de bloques compuestos por restos de demolición y otros	Sin selección	
		Parcialmente seleccionados	

Figura 4. Clasificación y caracterización de las obras de defensa del frente costero de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

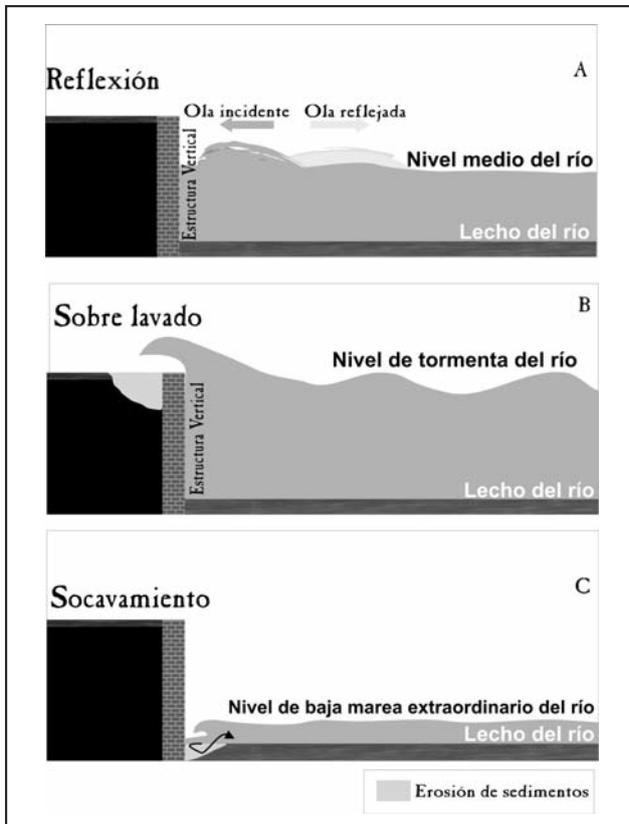


Figura 5. Fenómenos asociados a los paredones verticales en distintas condiciones energéticas del estuario. A. En condiciones de nivel medio del río. B. En condiciones extremas (sudestadas). C. En bajantes extraordinarias.

Los *paredones inclinados* están compuestos, en general, por bloques premoldeados de hormigón, ensamblados con juntas selladas de geometrías diversas. Estas estructuras las encontramos al frente de los rellenos más contemporáneos, en Costa Salguero, Punta Carrasco, Parque de la Memoria (Figura 6), como así también en los márgenes de la extensión de los Arroyos Manso y Medrano. Los paredones inclinados simples (Figura 4), tienen la ventaja de disipar los trenes de olas incidentes por refracción, disminuyendo el poder erosivo del oleaje. La reflexión en este tipo de estructuras es baja y por consiguiente afecta muy poco los depósitos subyacentes en su base. Los subtipos con paredones verticales en la base aumentan el fenómeno reflectivo, haciendo inestables los depósitos de lecho e induciendo al socavamiento. Los combinados con bloques en la base poseen una mejor respuesta a los fenómenos reflectivos y de socavamiento por mayor eficiencia en la disipación de la energía de ola. Las estructuras que poseen calle de circulación en el sector superior (Figura 4), disminuyen el efecto de sobre lavado durante las tormentas

Sin diseño ingenieril

El relevamiento de la ribera actual permitió reconocer trabajos de avance sobre la costa, sin proyecto ingenieril (Figura 4), nos referimos a los sectores en donde se han volcado restos de demolición y otros tipos de relleno en el frente costero. En este tipo de labores se pueden diferenciar 2 subtipos: *Frentes de bloques sin selección* y *los frentes de bloques parcialmente seleccionados*.

Las costas que no poseen un cierre ingenieril han sido en general conformadas por materiales de relleno, provenientes en su mayor parte de escombros de demolición no seleccionados



Figura 6. Construcción de paredones inclinados con bloques premoldeados de hormigón, en el sector norte de la Ciudad Universitaria.

de tamaños y composición variables. Así se han estabilizado los sectores costeros de la Reserva Ecológica y en algunos sectores del relleno correspondiente a Punta Carrasco y en las inmediaciones de la Ciudad Universitaria.

En el sector litoral norte de reserva ecológica y Ciudad Universitaria, se desarrollaron playas, producto del retrabajo de los escombros (Figura 7). Lo que indica que en la interacción entre la dinámica del estuario y el material aportado por los rellenos, el medio tiende a un desarrollo evolutivo de la playa artificial semejante a una playa natural, donde se pueden diferenciar Subambientes y morfologías características (barras, bermas y microacantilados). También resulta muy interesante el análisis del comportamiento de los materiales incorporados al sector costero, pudiéndose diferenciar la respuesta mecánica de los bloques según su composición (Figura 8).

Los frentes costeros compuestos por bloques, son áreas de peligrosidad para los habitantes, ya que el material no se encuentra seleccionado, conformando una zona de difícil tránsito y propicia a accidentes, que dificultan el acceso al río.

MATERIALES DE RELLENO

Los terrenos ganados al río se han rellenado con diversos tipos de material que en general no han tenido ningún tipo de selección previa ni prueba de calidad. Por consiguiente evaluando el material de relleno se puede diferenciar dos áreas de proveniencia:

- Continental: Son los materiales aportados del sector continental, que involucran por lo general restos de materiales provenientes de demolición de diferentes composiciones y tamaños, donde los hierros que componen las estructuras de hormigón afloran peligrosamente en las superficies de las playas por desgaste del hormigón. También son aportados a los sectores costeros suelos removilizados provenientes del tendido de las líneas de subterráneo y excavaciones de edificios.
- Estuarial: Son los sedimentos cuya extracción se realiza del lecho del río, preferentemente de composición limo-arenoso, generalmente provenientes de zonas costeras cercanas al sector de obras, por una cuestión de economía en los gastos de impulsión del refulado.

Es importante conocer que las áreas de relleno ganadas al río son terrenos inestables y poseen altas tasas de subsidencia diferencial. La inestabilidad de estos terrenos se debe a que los sedimentos introducidos presentan un muy bajo grado de compactación. La compactación óptima es difícil de alcanzar por medios mecánicos, lo cual involucra mayores tiempos de asentamiento para poder soportar infraestructura. También hay que considerar que el lecho del río en general es cubierto por el material de relleno, el cual provoca una sobrecarga a los niveles arcillosos preexistentes. La urbanización de estas áreas deberá considerar estos niveles compresibles para el diseño de sus fundaciones. La sobrecarga sobre estos bancos puede asimismo, ser afectada por vibraciones o cambios en las condiciones de



Figura 7. Desarrollo de playas en la Reserva ecológica.



Figura 8. Detalle de la composición de la playa desarrollada con el material aportado para relleno.

humedad existiendo la posibilidad de que se produzcan movimientos de suelos y variaciones en su capacidad portante.

CONSIDERACIONES FINALES

Marcomini y López (2004) han determinado que los cambios antrópicos en la configuración de la línea de costa han producido importantes variaciones en los arroyos que drenaban hacia el estuario por cambio en las pendientes de drenaje naturales y en la capacidad de transporte de sedimentos. El área que se rellena entre la costa original y la actual, de aproximadamente 2000 hectáreas, es receptora de lluvias que aporta un significativo ingreso de agua a la red de drenaje existente, lo que genera un retardo para que las mismas abandonen los sectores urbanos, sumado a la disminución de la pendiente de los arroyos, dando como resultado amplias áreas temporarias inundadas.

A pesar de la sucesión de modificaciones realizadas en la costa, son poco apreciables los efectos erosivos en los sectores costeros, ya que las condiciones hidrodinámicas propias del estuario son netamente acumulativas, por lo que, en general los impactos están relacionados con un incremento en las tasas de acumulación y los problemas asociados a embancamientos y dragados.

CONCLUSIONES

El estudio evolutivo de las geoformas y su relación con las estructuras costeras de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, permite afirmar que el factor antrópico actuó como un proceso modelador, de gran importancia en la morfogénesis de los nuevos ecosistemas costeros, donde los procesos hidrodinámicos naturales se adaptaron a las morfologías diseñadas por el hombre y los materiales.

La costa no conserva las características naturales por lo cual la valoración del paisaje por su naturalidad es baja, no obstante ello los ecosistemas se han desarrollado muy rápidamente sobre las áreas rellenadas incrementando, en ciertas áreas, su valoración (muchos de estos sectores, a lo largo de la costa del estuario, fueron declarados como reservas). Las altas tasas de depositación, la amplia disponibilidad de especies aportada por

el río Paraná, las condiciones climáticas y el ambiente estuarial hacen que estos ecosistemas se regeneren muy rápidamente (rangos de 10 a 20 años).

Las acciones humanas en el sector litoral, construcción de escolleras, rellenos artificiales, muelles, etc. tienden a incrementar las tasas de acumulación y progradación costera pues actúan como trampas de sedimentos aportados principalmente del frente deltaico. También provocan el incremento de las áreas inundables en las cuencas de los arroyos, cuyo tramo de desembocadura perdió pendiente disminuyendo su eficiencia para evacuar los excedentes durante precipitaciones extremas.

Las áreas de relleno son terrenos que presentan tasas de subsidencia diferencial debido a la heterogeneidad de los materiales utilizados y a su condición contemporánea. Esta situación obliga a realizar fundaciones profundas, en las construcciones, para obtener las condiciones portantes necesarias.

El relevamiento de las estructuras de defensa de costa evidenció que los paredones verticales son las defensas más representativas de la actual línea de costa, pero generan mayores condiciones erosivas, ya que son los más reflectivos y ante eventos extremos generan socavamiento y sobrelavado.

Las estructuras de bloques con selección de material y granulometría adecuada, son una alternativa aceptable para reconstruir subambientes de playa, que si bien no son semejantes a los ambientes originarios se adaptan a la hidrodinámica del río, generando sectores de esparcimiento y acceso directo al Río.

Es fundamental efectuar una selección del material de relleno desde el punto de vista físico y químico ya que los mismos pueden producir impactos negativos sobre el suelo, el agua o directamente sobre el hombre.

Antes de emprender cualquier proyecto parcial es necesario efectuar una política de manejo global que abarque los municipios lindantes de manera tal de diagramar una configuración definitiva de la línea de costa que involucre aspectos sociales, culturales y económicos de la población tendientes a generar espacios naturales y de recreación para la población.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

AMEGHINO, F. 1880

“La Formación Pampeana”
pp 376 Paris, Buenos Aires

AUGE M., 1990.

Aptitud del agua subterránea en La Plata, Argentina.
Seminario Latinoamericano sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Actas:191-201. Buenos Aires.

AUGE M. 2006.

Hidrogeología de la Ciudad de Buenos Aires, Serie Contribuciones Técnicas Ordenamiento Territorial 6.
Segemar. 42.

BERJMAN, S., 2001.

La plaza española en Buenos Aires.
1580-1880. 205p.

CODIGNOTTO, J.O. Y MARCOMINI, S.C., 1993.

Argentine deltas morphology.
Proceedings of the Eight Symposium on Coastal and Ocean management, New Orleans, USA.3323-336.

DALLA SALDA, L. 1981

“El basamento de la Isla Martín García-Río de la Plata”
Rev. Asoc. Geol. Arg. XXV; pp 29-43, Buenos Aires.

- HOLOCWAN, P.T., 1996.
Evolución y acreción antrópica en el sector costanero de la ciudad de Buenos Aires.
Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, X: 144-168. Buenos Aires.
- LÓPEZ, R.A. Y MARCOMINI, S.C., 1995.
Consideraciones para el manejo de Puertos deportivos en el río de La Plata, Club Náutico Quilmes.
Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, IX:78-94.
- LÓPEZ R.A. Y S.C. MARCOMINI, 2002.
Pautas para el manejo costero en costas de dunas y acantilados, Provincia de Buenos Aires.
Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente. No 18, 59-68.
- MARCOMINI, S.C. Y LÓPEZ, R.A., 2004.
Generación de nuevos ecosistemas por albardones de relleno en la costa de la ciudad de Buenos Aires.
Revista de la Asociación Geológica Argentina, 59(2):261-272.
- MARCOMINI S.C. Y LÓPEZ R. A., 2006.
"La línea de costa del Río de La Plata".
Manual de manejo costero para la provincia de Buenos Aires. Eds: I. Isla y C. Lasta. EUDEM, Mar del Plata, 85-112.
- MARCOMINI S.C. Y LÓPEZ R. A., 2011.
"Problemática ambiental del estuario del Río de La Plata y Delta del Paraná".
Problemática de los Ambientes Costeros, Sur de Brasil, Uruguay y Argentina. Eds. López R.A. y Marcomini S.C. Ed. Croquis. Buenos Aires.129-144.
- PEREYRA, X., MARCOMINI, S., LÓPEZ, R., MERINO, M. Y NABEL, P., 2001.
Caracterización del medio físico de la ciudad de Buenos Aires y área metropolitana.
Informe Inédito. Convenio F.C.E y N., UBA- GCABA. 214 p.
- RIMOLDI V. H., 2001.
Carta Geológica Geotécnica de la Ciudad de Buenos Aires.
Serie de contribuciones técnicas. Ordenamiento Territorial, No 3. SEGEMAR.
- SOLDANO, 1947.
Régimen y aprovechamiento de la red fluvial Argentina: El río Paraná y sus tributarios.
Pp.264.
- YRIGOYEN, M.R., 1993.
Morfología y Geología de la Ciudad de Buenos Aires.
Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, VII:7-38.

INSTRUCCIONES PARA AUTORES

La Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente publica: Artículos Originales, Artículos Invitados, Notas Técnicas, Reseñas de Libros, Artículos especiales sobre casos de estudio históricos de interés relevante, Discusiones Técnicas breves de artículos y comunicaciones publicadas en la Revista y Anuncios de eventos.

En atención al procedimiento de arbitraje, se solicita a los autores leer y seguir estrictamente las siguientes instrucciones:

a) De carácter general:

- Las contribuciones deben ser originales.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no ha sido publicado, total o parcialmente, con anterioridad.
- El/los autor/es deberá/n garantizar que el artículo no será publicado en otras publicaciones en cualquier idioma sin el consentimiento de los propietarios de los derechos de autor (o copyright), que los derechos de terceros (terceras partes) no serán violados y que el editor no será considerado legalmente responsable si existe algún reclamo de indemnización.
- Se podrán recibir trabajos escritos en español, portugués o inglés.
- El Comité Editorial y la Dirección de la Revista se reservan la posibilidad de invitar a especialistas reconocidos a enviar artículos sobre temas de interés específico

b) Sobre el formato y la extensión del texto, tipos de letra, páginas, párrafos y leyendas:

- La versión original deberá ser editada en Microsoft Word (.doc o .docx).
- En la primera página se deberá incluir el título del artículo, que debe ser conciso, informativo e indicativo del contenido del mismo y escrito sin utilizar abreviaturas. Se debe utilizar letra Times New Roman tamaño 12, mayúscula, negrita y centrado, sin subrayar.
El título se debe expresar en español y en inglés. Si el trabajo está escrito en portugués, también se debe incluir en inglés. Si el trabajo está escrito en inglés, también se debe incluir en español.
- Debajo del título, el texto centrado, en letra Times New Roman tamaño 10, con los datos de los autor/es y afiliaciones. Los nombres de los autores se deben escribir en letra normal, las afiliaciones y direcciones de correo electrónico en letra cursiva. Se deberá identificar con un superíndice al autor que se deba dirigir la correspondencia.
- Desde la segunda página comienza el desarrollo del trabajo. Se debe incorporar, en forma consecutiva, el "Resumen" de hasta 250 palabras; un "Abstract", y opcionalmente se podrá incorporar el "Resumo" en portugués, de hasta 200 palabras y las Palabras Clave en un número entre 3 y 5 y las correspondientes "Keywords" y "Palavras chave" en portugués.
- En el caso que el idioma del trabajo no sea español, la primera sección será el "Abstract", además de un resumen en el idioma en el que está escrito el trabajo. A continuación el resumen en español y tras ello el desarrollo.
- Todo el texto deberá estar escrito en letra Times New Roman punto 12 a un espacio de interlínea, sin sangrías (ya sea mediante tabulador o espacios) y sin doble espacio entre párrafos. Se conservarán los destacados que el autor considere convenientes, así como los correspondientes a determinados términos científicos o expresiones latinas o extranjeras. Deberá estar escrito en una sola columna.
El tamaño de la hoja es A4 (210 x 297 mm). El área de trabajo será de 170 mm de ancho y 247 mm de altura. Es decir, 20 mm de márgenes derecho e izquierdo y márgenes superi-

or e inferior de 25 mm. Se debe usar justificación completa.

- La extensión no deberá superar las 20 páginas en el caso de Artículos Originales. En el caso de Artículos Invitados la extensión podrá ser superior, siempre que el interés del contenido lo justifique y previo acuerdo con la Dirección de la Revista y el Comité Editorial. En el caso de las Notas Técnicas la extensión no deberá superar las 3 carillas, y en el resto de las situaciones mencionadas una página. En todos los casos la fuente y los márgenes se conservan.
- Es obligatorio el uso del sistema métrico decimal.
- Cuando una abreviatura, o un acrónimo, aparezca en el texto por primera vez, su significado deberá ser aclarado en forma completa entre paréntesis.
- No se aceptarán notas de pie de página. La información respectiva deberá incorporarse en el texto.
- Las expresiones matemáticas deben ser elaboradas con el procesador de texto y formar parte del mismo. Las ecuaciones deben estar centradas y separadas por una interlínea. Todas las ecuaciones deben estar numeradas consecutivamente, usando numerales en paréntesis alineados al margen derecho. La secuencia de paréntesis deberá ser la usual en Matemática:}}).
- Las fórmulas deben ser digitadas. Deje un espacio amplio alrededor de la fórmula.
- Los subíndices y superíndices deben ser claros.
- Los caracteres especiales y otras letras no latinas deben ser explicados en el margen, donde sean usados por primera vez. Tenga especial cuidado en diferenciar entre cero (0) y la letra "o", y entre uno (1) y la letra "l".
- Proporcione el significado de todos los símbolos inmediatamente después de la ecuación en la que son usados por primera vez.
- Para fracciones simples use el símbolo "/" en lugar de la línea horizontal; por ejemplo: Sy/Xm en lugar de $\frac{Sy}{Xm}$
- En las fórmulas químicas deben especificarse la valencia de los iones como, por ejemplo, Ca^{2+} y CO_3^{2-} , no como Ca^{++} o CO^{-3} .
- Los números de isótopos deben indicarse mediante un superíndice antecediendo a los símbolos químicos, por ejemplo: ^{18}O .
- Donde sea posible se debe evitar la escritura repetida de fórmulas químicas en el texto. En lugar de ello se debe dar el nombre completo del compuesto. Se exceptuarán aquellos casos de nombres muy largos y frecuentes, o de compuestos que son descritos como el producto final de una determinación gravimétrica (ejemplo: fosfato como P_2O_5).

c) Sobre el formato de figuras y tablas:

- Se incluirán como figuras todas las ilustraciones, mapas, fotografías, gráficos, etc., presentes en el texto, que deberán llevar numeración arábiga correlativa por orden de aparición y se ajustarán al tamaño de la caja.
Las ilustraciones deben diseñarse teniendo en cuenta el formato de la página de la revista. Su tamaño original debe permitir una reducción del 50%, sin pérdida de claridad. Deben tener una resolución mínima de 300 dpi.
- Se deben evitar los espacios en blanco sobrantes alrededor de la figura, o la presencia de grandes sectores sin información en el interior de la misma.
- Todas las figuras llevarán su correspondiente leyenda, inmediatamente después de la misma, la que no se debe incluir en el cuerpo de la figura. Se usará letra Times New

Roman punto 12, a interlineado sencillo. La figura y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Figura n: donde n es el número de orden que corresponda. Se recomienda que las leyendas sean cortas y concisas.

- Las figuras serán citadas en el texto como (Figura n), siendo n el número de orden que corresponda, sea directamente como Figura 1, por ejemplo, o bien entre paréntesis como (Figura 1). Se deberán limitar, como máximo, a una caja de 15 x 23 cm, debiendo considerar el espacio ocupado por el epígrafe. Se las deberá enviar como archivos individuales en uno de los formatos aceptables (.tif, .jpg, .pdf o .eps). No se aceptan archivos incluidos en documentos de otros formatos, como Word o PowerPoint, por ejemplo. En el caso de una figura compuesta por varias imágenes las mismas deberán estar debidamente identificadas con una letra en la esquina inferior derecha de la misma.
- Las fotografías (y figuras en formato raster con tono continuo) deben ser pancromáticas, contrastadas, claras y con una luz adecuada, ni demasiado clara ni oscura. Deben ser enviadas como archivos .tif, .jpg, .pdf o .eps. No se aceptarán fotografías en color. Las fotografías en color serán reproducidas en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
Deberán incluir escala, vertical y horizontal en caso de ser distintas, cuando no existan elementos en la misma que permitan su dimensionamiento (escala, cinta métrica, martillo geológico, brújula, vehículo, etc.).
- Las figuras delineadas o dibujos deben ser contrastados y claros.
- Las figuras de tipo mapa deben estar orientadas, incluir escala gráfica e indicación de la localización geográfica (trazas UTM o Lat/Long). Deberán tener referencias adecuadas a los símbolos, rastras, etc. utilizados. No se aceptarán mapas en color. Los mapas en color serán reproducidos en escala de grises, salvo que él o los autores del trabajo se hagan cargo de la diferencia de costos.
- Se debe utilizar la misma tipografía en todas las ilustraciones.
- Los gráficos deben poseer ejes de coordenadas correctamente rotulados y con indicación de la unidad de medida correspondiente, en el caso que corresponda.
- Las tablas deben ser remitidas en páginas separadas, indicando su ubicación dentro del texto. Se deben remitir como archivo de texto y no como imagen.
- Las Tablas serán citadas en el texto iniciando con mayúscula en citas directas, o indirectas entre paréntesis. Es decir como Tabla 1, o bien (Tabla 1).
- La información presentada en las tablas no debe aparecer repetida en las figuras.
- Cada tabla debe llevar, del mismo modo que las figuras, una leyenda breve y explicativa, en la parte inferior. Se usará letra Times New Roman punto 12, a interlineado sencillo. La tabla y el número irán en negrita, sin subrayar, seguidas por dos puntos, en la forma Tabla n: donde n es el número de orden que corresponda.

d) Sobre las referencias bibliográficas y las citas de trabajos de otros autores

- No se admite la reproducción de figuras o tablas originales de otros artículos o capítulos de libros si no se dispone de la autorización expresa de quién detente los derechos, es decir de la editorial responsable de la publicación correspondiente o bien del autor o los autores. La reproducción autorizada de tablas, fotografías u otras ilustraciones procedentes de otros trabajos deberá incorporar en el epígrafe la cita del tra-

bajo original de donde fue obtenido. Con respecto a las figuras, en el caso que la misma se reelabore, o de una tabla, que sea editada, se deberá indicar “modificada a partir de ...” seguido de la cita del artículo original.

- A los autores que deseen incluir figuras tablas o secciones completas de texto que ya han sido publicados en otras publicaciones, se les requiere obtener el permiso del/de los propietario/s del copyright y que incluyan evidencias que dicho permiso ha sido concedido al presentar sus artículos. Todo ello sin perjuicio que otras inclusiones de párrafos, definiciones, conceptos o clasificaciones provenientes de otros autores puedan ser aceptadas con la cita expresa de la referencia correspondiente. Cualquier material recibido sin esa documentación será considerado como originado por los autores, quienes, por lo tanto, deberán asumir la responsabilidad legal correspondiente.
- Las referencias bibliográficas serán incluidas bajo el título de TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO. Las mismas deberán estar ordenadas alfabéticamente.
- La cita de trabajos en el texto estará referida a la lista bibliográfica final, indicando apellido de los autores (en mayúsculas) y año de publicación entre paréntesis, por ejemplo: (Caminos, 1975). En caso de ser más de dos autores se usará et al. (en itálica, sin subrayado ni negrita). Cuando se cite más de un trabajo del mismo autor se separarán por una coma, por ejemplo: Caminos (1956, 1978). En el caso de ubicar varios autores dentro del paréntesis se separarán entre ellos por un punto y coma. Si se citan varios trabajos del mismo autor y del mismo año se agregarán, a continuación del año, letras, de acuerdo al orden de aparición en el texto.
- Las citas bibliográficas estarán justificadas a la izquierda y la segunda línea tendrá una sangría especial francesa de 15 puntos ó 0,75 cm.
- Los artículos en publicaciones periódicas se citarán empleando texto en cursiva sea para el título de la revista o actas de congreso o reunión científica, en el caso de artículos o el título del libro, en el caso de textos:
CARRANZA TORRES, C.M., 1991. Cálculo analítico de redes de filtración. Actas de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Vol. VI: 250-267.
- Los artículos en textos:
MATEOS RUIZ, R.M. y M. FERRER GIJÓN, 1994. Methodology for landslides hazard map 1:10,000 in the area of Monachil (Granada, Spain). En R. Oliveira, L.F. Rodrigues, A.G. Coelho & A.P. Cunha (eds.), 7th International Congress International Association of Engineering Geology, Vol III: 2059-2064, Rotterdam.
- Los libros de textos:
DEARMAN, W.R., 1991. Engineering geological mapping. Butterworth-Heinemann Ltd, 387 pp. Oxford.
- En el caso de citar un párrafo o frase de otro trabajo, éste deberá aparecer entre comillas y cursiva, acompañada de la correspondiente cita. Por ejemplo,.... según Casio et al., (1980), “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma”... o bien directamente “la caída del imperio romano fue resultado de irresueltas luchas políticas entre las principales familias de Roma” (Casio et al., 1980).
- Las citas correspondientes incluirán a la totalidad de los autores. Ejemplo para Casio et al., (1980):
CASIO, M.; MARCINUS, F; SALINA, R y HUBBARD, R.T., 1980. La caída del imperio romano. Revista de Occidente, Vol 180: 224-234.
- Las citas correspondientes de páginas Web se efectuarán de acuerdo al siguiente modelo: Barker, A and C Jones 2007.

Reassessing the direction of postgraduate environmental assessment education: the Manchester experience 1996–present. En *Environmental Assessment Lecturer's Handbook*, ed. T B Fischer et al., pp. 29-38. Disponible en <<http://www.penta-eu.net>>, ultimo acceso 28 de Junio de 2010.

e) Notas Técnicas

- Es un artículo original que describe un proceso o técnica sin incluir, necesariamente, una exposición teórica y datos. También puede referirse a un estudio de caso, el que por lo novedoso de los datos que se obtienen o de las técnicas utilizadas, el/los autor/es consideran de interés su difusión. La extensión total del manuscrito, que no debe superar las

3 (tres) páginas y ajustarse a los parámetros mencionados en el punto b, incluye Resumen, Abstract, palabras clave, keywords, hasta 2 (dos) figuras y una tabla acorde a lo establecido en el punto c. Las referencias bibliográficas deberán respetar lo establecido en el punto d.

f) Arbitraje

- La evaluación por pares es efectuada mediante el envío del original a dos evaluadores. En el caso de disparidad de opiniones, se remite a un tercer evaluador.
- Los Editores se reservan la posibilidad de tomar la decisión final en el caso que la tercera evaluación no establezca si el artículo debe ser aceptado, o no, para su publicación.

**Revista de Geología
Aplicada a la Ingeniería
y al Ambiente**

FORMULARIO DE SUSCRIPCIÓN O COMPRA

ENVIAR A:

Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería
Maipú 645 - Piso 1° - C1006ACG
Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Argentina

(Una vez completado el formulario envíelo a la dirección antes mencionada)

1. Suscripción a la *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, por el corriente año (marcar la siguiente casilla) []

2. Deseo adquirir los números *atrasados*:

_____ []

3. Deseo comprar los artículos:

_____ []

Indique si desea recibir su pedido en formato *papel* (por correo tradicional), o en formato *electrónico en fichero pdf* (por correo electrónico):

FORMA DE PAGO

Adjuntando cheque a nombre de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.

Mediante depósito en la Cuenta Corriente N° 20566/5 Sucursal 115 del Banco Santander Río

Mediante transferencia bancaria a la Cuenta Corriente. CUIT: 30 - 67660597- 1.

CBU 0720 11542 000000 2056654

Solicitud de *factura* para pago mediante transferencia.

PRECIO DE COMPRA (Desde 01-06-2013):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Compra de número vigente: **320** Pesos
- Compra de número atrasado: **280** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **135** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Compra de número vigente: **58** Dólares
- Compra de número atrasado: **50** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **30** Dólares por artículo

PRECIOS DE SUSCRIPCIÓN (Desde 01-03-2013):

Para Argentina: Gastos de envío incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **320** Pesos, en formato electrónico, y **430** Pesos en edición papel
- Suscripción Instituciones: **1280 / 1720** Pesos
- Compra de número atrasado: **280** Pesos
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **135** Pesos por artículo

Para el exterior: Gastos de envío no incluidos.

- Suscripción anual: dos números.
- Suscripción normal: **58/78** Dólares, según se trate de edición electrónica o impresa
- Suscripción Instituciones: **232/312** Dólares
- Compra de número atrasado: **50** Dólares
- Compra de artículos sueltos (se enviarán en formato electrónico .pdf): **50** Dólares por artículo

Envíos fuera de Argentina: se añadirán gastos de envío a los precios anteriormente señalados. Ver tarifas de correos en: www.correoargentino.com.ar

Quienes quieran asociarse a la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería encontrarán información a tal efecto en www.asagai.org.ar

Los Socios de ASAGAI reciben sin cargo alguno la revista.

Copyright
© Editorial ASAGAI. 2013
Printed in Argentina

Se terminó de imprimir en Junio de 2013