



Propuesta Metodológica para el Análisis de la Licuefacción de Suelos Asociada a Sismos Destructivos. Pre-Andes Centrales, Argentina (31° 30' S y 68° 25' O)
Propuesta Metodológica para el Análisis de la Licuefacción de Suelos Asociada a Sismos Destructivos. Pre-Andes Centrales, Argentina (31° 30' S y 68° 25' O)
Methodological Proposal for Soil Liquefaction Analysis Associated to Destructive Earthquakes. Central Pre-Andes, Argentina (31° 30' S and 68° 25' W)

Silvia Beatriz Palacios¹; Laura Patricia Perucca²; Ana Pantano² & Gabriela Lara²

¹Gabinete de Neotectónica y Geomorfología. INGENIO. FCEFyN-UNSJ.

Avda. Ignacio de la Roza 590 Oeste. Complejo Universitario Islas Malvinas. Departamento Rivadavia, Provincia San Juan- Argentina

²CONICET- Gabinete de Neotectónica y Geomorfología-INGENIO-FCEFyN-UNSJ.

Avda. Ignacio de la Roza 590 Oeste. Complejo Universitario Islas Malvinas. Departamento Rivadavia, Provincial San Juan- Argentina

E-mails: silbea09@gmail.com; lperucca@unsj-cuim.edu.ar; anapantano7@gmail.com; gabylara21@hotmail.com

Recibido em: 23/11/2016 Aprobado em: 17/01/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_55_69

Resumen

En este trabajo se evalúa la susceptibilidad a la ocurrencia de procesos de licuefacción de suelos asociados a sismos destructivos en el área ubicada al norte del río San Juan. Los terremotos de 1894, 1944, 1952 y 1977 provocaron licuefacción en el centro oeste de Argentina y particularmente en numerosos sitios de la provincia San Juan, resultando la zona norte del valle de Tulum, una de las más afectadas. Los registros históricos de procesos de licuefacción de suelos (PLS) ocurridos durante los terremotos mencionados, evidencian grietas, volcanes de arena, cráteres y asentamientos diferenciales, los que ocasionaron importantes daños a las viviendas y al sector agro industrial de la región. En este estudio se efectuó un análisis de los factores principales que influyen en su ocurrencia, como también los efectos de la licuefacción. Se evaluaron y ponderaron los factores condicionantes tales como origen y granulometría del depósito, edad de los depósitos, profundidad del nivel freático y registros históricos entre otros. Del análisis de los factores resultó un mapa asociado a una tabla evaluativa. La influencia de los factores en la evaluación de la susceptibilidad se realizó mediante un proceso iterativo de superposición de mapas. Una vez conseguida la combinación óptima se obtuvo un mapa final de susceptibilidad a la licuefacción. La zonificación lograda se relacionó a un índice de susceptibilidad (IS), catalogado cualitativamente como Muy Alto, Alto, Moderado y Bajo. Los resultados obtenidos permiten concluir que el sector medio del abanico aluvial del río San Juan, donde se concentran los centros urbanos y la mayor actividad agropecuaria, es el sitio donde se exponen las condiciones de Muy Alta susceptibilidad, mientras que las de Alta susceptibilidad ocupan algunas zonas del sector medio-distal del abanico y las de Moderada a Baja se circunscriben al sector proximal del abanico.

Palabras clave: Terremotos; Licuefacción; Susceptibilidad; Abanico aluvial; valle de Tulum

Abstract

In this paper we evaluate the susceptibility to the occurrence of soil liquefaction processes associated with destructive earthquakes in the north of the San Juan River area. The earthquakes of 1894, 1944, 1952 and 1977 triggered liquefaction processes in central west Argentina and particularly in many places of the San Juan Province, being the northern area of the Tulum valley, one of the most affected. Historical records of soil liquefaction processes (PLS) occurred during the above mentioned earthquake include cracks, sand volcanoes, craters and differential settlements, which caused major damage to housing and agro industrial activities. In this study, we made an analysis of the key factors that influence their occurrence, as well as the effects of liquefaction. The methodology used to estimate liquefaction of soils consisted in evaluating the conditioning factors such as origin and grain size of the deposits, age of the deposits, phreatic level depth, and historical records, among others. From the analysis of these factors resulted a map associated with an evaluative table.

The influence of each factor in the evaluation of the susceptibility was performed using an iterative process of overlapping maps. Once achieved the optimum combination, a final map of susceptibility to liquefaction was obtained. Zonation obtained was related to a susceptibility index (IS), qualitatively classified a Very High, High, Moderate and Low. The obtained results allow to conclude that in the middle portion of the alluvial fan of the San Juan River, where urban centers and most agricultural activities are concentrate, is where the condition of Very High susceptibility are exposed, while the High susceptibility occupy some distal to medium alluvial fan portion and Moderate to Low circumscribe to the proximal area of the alluvial fan.

Keywords: Earthquake; Liquefaction; Susceptibility; Seismogenic sources; Alluvial Fan; Tulum valley

1 Introducción

El peligro sísmico de una región depende de las características geológicas y de la estructura geotécnica del área. Existen varias amenazas de origen sísmico que pueden poner en peligro las construcciones, tales como densificación, licuefacción, flujos, deslizamientos y amplificación de las vibraciones del terreno (OPS, 2003). Uno de los peligros más importantes es la licuefacción de suelos ya que afecta seriamente la estabilidad de las estructuras que se encuentran fundadas en el suelo, por la pérdida total de la resistencia y capacidad de soporte, pudiendo inclusive extenderse los daños a las instalaciones enterradas. La licuefacción es un término usado para describir un proceso en el cual la resistencia y la rigidez de un depósito de suelos se reducen debido a un aumento de la presión de poros. Aunque es posible que el proceso se produzca por cargas estáticas, es comúnmente inducido por cargas cíclicas. El fenómeno se manifiesta en suelos de textura arenosa o arenas limosas sueltas, saturadas y limpias aunque también ha sido observado en gravas y limos poco plásticos. Los daños que puede producir el PLS van desde pequeños hundimientos y desplazamientos laterales (*lateral spreading*) hasta deslizamientos de grandes masas de suelos. Además puede causar grandes asentamientos o inclinaciones en fundaciones y estructuras de retención (Kramer & Stewart, 2004). Autores como Obermeier *et al.* (1990, 1993); Tinsley *et al.* (1985) y Amick *et al.* (1990) coincidieron en señalar que los factores que condicionan los procesos de licuefacción son los siguientes:

- *Edad de los materiales sedimentarios*: Los suelos jóvenes (menos de 3.000 años) son débiles y no cohesivos y por lo tanto son más susceptibles a la licuefacción que los suelos más antiguos.

- *Profundidad del nivel freático*: La licuefacción disminuye notablemente con un nivel freático por debajo de los 3 m, sólo en condiciones particularmente inestables se genera licuefacción por debajo de esta profundidad.

- *Tamaño y forma del grano*: El tamaño arena de medio a fino es vulnerable a la licuefacción. Las arenas uniformemente graduadas, de grano muy grueso a medio tienen mayor probabilidad de licuarse, mientras que las

arenas limosas finas y las gravas lo hacen bajo cargas cíclicas más severas.

- *Origen de los sedimentos*: Los sedimentos de grano fino, depositados en ambiente lacustre y fluvial y ocasionalmente sedimentos marinos y costeros (playas) son más licuables. Los suelos depositados por procesos fluviales, litorales y eólicos se sedimentan fácilmente y sus granos tienen poca probabilidad de compactarse, de modo que se licuarán con facilidad.

- Los depósitos glaciales son densos y tienen menor probabilidad de licuarse. Suelos compuestos por roca no son en absoluto licuables.

- *Potencia de los sedimentos*: Se necesitan espesores mínimos de 3 m de arenas o de alternancia de limos y arenas.

- *Amplitud y duración de la vibración del terreno*: La probabilidad de licuefacción de suelos aumenta con la magnitud (sismos con magnitudes mayores a 5) y la duración del sismo.

- *Peso del recubrimiento y profundidad del suelo*: Las tensiones entre partículas aumentan a medida que aumenta la presión del recubrimiento. Mientras mayor sea dicha tensión menor será la probabilidad de que ocurra el proceso. En general, la licuefacción se da a profundidades menores de 9 m y ocasionalmente a más de 15 m.

Este trabajo aporta una metodología para la evaluación de los procesos de licuefacción de suelos asociados a sismos destructivos, basada en un análisis detallado de factores históricos y geológicos. Los resultados de estos estudios han permitido establecer criterios de planeamiento urbanístico en el ámbito regional y local. La metodología utilizada es una contribución a futuros estudios, ya que puede ser aplicada a zonas igualmente sísmicas y con características geológicas similares. Como objetivo se propuso identificar el grado de susceptibilidad a la licuefacción en los suelos que conforman la planicie aluvial del río San Juan, margen norte del río homónimo. A partir del análisis de los factores condicionantes se pudo zonificar el área aplicando un índice de susceptibilidad (IS).

El área de estudio se localiza en la provincia de San Juan, en los pre-Andes del centro-oeste de la República Argentina, entre 31° 20' – 31° 30' S y 68° 15' – 68° 25' O. La zona comprende el extremo septentrional del Valle de Tulum, extendida al norte del río San Juan (Figura 1a).

El abanico aluvial del río San Juan fue sectorizado en: sector Proximal-medio, Medio y Distal (Figura 1b).

La población en este sector corresponde al 7,2 % del total de la provincia de San Juan.

El cultivo principal de la región es la vid y la mayoría de las actividades económicas tienen que ver con los establecimientos industriales para su procesamiento. Dada la importancia de la producción para el desarrollo económico y social de la zona, es que está incorporada al comercio económico regional del Mercosur. Otros cultivos de relevancia son los emprendimientos frutihortícolas en el marco de programas de diferimientos impositivos.

2 Metodología

Los procesos de licuefacción de suelos en la provincia de San Juan se han repetido a lo largo de su historia sísmica, durante los terremotos de 1894, 1944, 1952 y 1977. Ello demuestra que hay zonas con una elevada tendencia a repetir el fenómeno, mientras que en otras, la tendencia es menor. Los registros históricos permiten deducir que estos procesos podrían presentarse en eventos sísmicos futuros con igual o mayor magnitud que en eventos previos, lo que justifica un análisis detallado de los factores que influyen en su ocurrencia (Palacios, 2015). Los factores considerados en este trabajo para evaluar la susceptibilidad de licuefacción en los suelos son: 1) distribución y tamaño del grano, 2) origen y edad del depósito, 3) profundidad de los estratos licuables, 3) tipos de suelos, 4) aceleración superficial máxima, 5) magnitud del sismo en función de la distancia epicentral, 6) profundidad del nivel freático y 7) licuefacción histórica.

Del análisis de cada factor se obtuvo un mapa y una tabla evaluativa, asociando las características del sitio a un valor o clasificación que resume “qué tan propicia es esa cualidad para que se genere el proceso de licuefacción”. Los valores asignados van del 9 al 1, de más a menos favorable respectivamente,

adoptando sólo números enteros e impares (1, 3, 5, 7, 9) lo que facilitó la identificación y el manejo de la información. La influencia o preponderancia de cada factor en la evaluación de la susceptibilidad de licuefacción se realizó mediante un proceso iterativo de superposición de los mapas zonificados de: nivel freático, suelos, aceleración y licuefacción histórica. Cada uno de los mapas zonificados se superpuso a una grilla georeferenciada (formada por celdillas de 1cmx1cm). Para facilitar la lectura de la grilla se colocó en cada extremo de la celda el valor asignado a cada factor y en el centro de la misma, el resultado de la sumatoria de los mismos. Esto permitió comparar cada valor de un mapa en la misma posición espacial (la misma celda de una malla regular).

3 Resultados

3.1 Análisis de los Factores

3.1.1 Factor Origen y Granulometría de los Depósitos

Para clasificar el potencial de licuefacción en función del Factor Origen y Granulometría de los Depósitos se tuvo en cuenta que tanto las arenas y gravas (cuyos granos son redondeados y de tamaño uniforme) como los limos (groseros sueltos y sin cohesión) son los más susceptibles a licuar. Por el contrario, el contenido de finos como las arcillas, generan en los granos de suelo suficiente adhesión, lo que limita su capacidad para generar licuefacción.

En la evaluación de este factor se tuvo en cuenta la profundidad y el espesor de las capas de arena (datos de ubicación de pozos aportados por el departamento Hidráulica), como también el tipo de suelo en función de su textura, según datos aportados por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA, 1976).

El análisis granulométrico obtenido de los pozos de sondeos dio como resultado que:

En el sector proximal/medio del abanico se encuentran capas de arena a 3 m de profundidad, con espesores entre 5 y 10 m, asignándoles un valor 9. Se asignó un valor 7 a los depósitos del sector medio del abanico. En este sector las capas de arena tienen entre 3 y 25 m de espesor y en ocasiones se intercalan con arcillas. La profundidad de las capas

Propuesta Metodológica para el Análisis de la Licuefacción de Suelos
 Asociada a Sismos Destructivos. Pre-Andes Centrales, Argentina (31° 30' S y 68° 25' O)
 Silvia Beatriz Palacios; Laura Patricia Perucca; Ana Pantano & Gabriela Lara

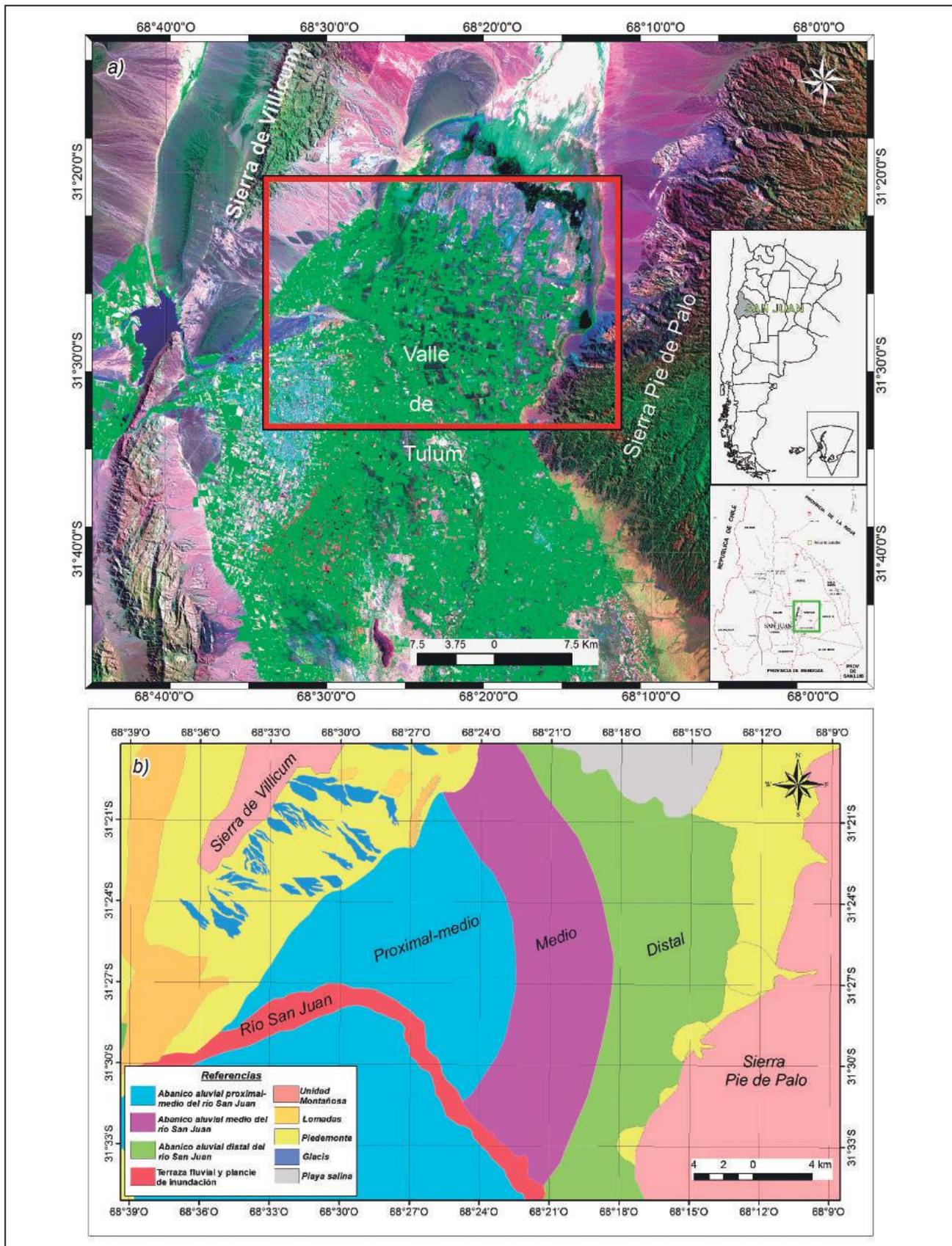


Figura 1 a. Ubicación del área de estudio; b. Sectorización del abanico aluvial del río San Juan. Proximal-medio, Medio y Distal.

de arena en su mayoría está por debajo de los 30 m y las menos entre 3 y 20 m. Al sector distal del abanico se le asignó un valor 5; lo conforman capas de arena con espesores que varían entre 10 y 60 m a profundidades superiores a los 30 m. Se incluyó en el análisis de este factor a las características texturales de los perfiles tipo, diferenciando aquellos que reunían características litológicas propicias para generar el proceso. Teniendo en cuenta estos criterios se asignó un valor 9 (color rojo) a las siguientes unidades cartográficas: Serie Canal Puntilla (Cp): Suelos con capas de textura Franco arenosa a arenosa y a la Serie Pie de Palo: (Pp): Suelos con texturas que varían de franco arenosa a arenosa (Figura 2a).

Se estableció un valor 7 (color anaranjado) a la Serie Belgrano (Be): Suelos Franco arenoso, areno franco, excepcionalmente arenoso y subsuelo franco limoso, franco arcillo limoso, franco arcilloso o arcilloso (Figura 2a). Se asignó un valor 5 (color amarillo) a la Serie Sarmiento (St): Areno franco a franco arenoso y subsuelo arcilloso limoso o franco arcilloso (Figura 2a). Se dio un valor 3 (verde oscuro) a la Serie Mitre (Mi): Franco arcilloso, Franco arcilloso limoso a arcilloso, subsuelo arenoso a franco arenoso (Figura 2a).

Se asignó un valor 1 (verde claro) al Complejo El Salado: Con distintas texturas apoyado sobre un subsuelo de gravas, gravillas o rodados y al Complejo El Salado: Textura arcillosa, franco arcillo-limosa o limosa y el subsuelo varía entre arenosa a franco arenoso (Figura 2a). Los principales parámetros para definir las Series, son la textura, secuencias de capas y profundidad de las mismas. También se admite para cada Serie variaciones de sus características principales, creándose fases y complejos de suelos (INTA, 1976).

3.1.2 Factor Aceleración Máxima Instrumental

El hecho de que un suelo arenoso sea susceptible de licuar, no significa que la licuefacción vaya a ocurrir; para ello es necesario que el nivel de excitación sísmica (aceleración superficial y duración del sismo) sean tales que se alcance la situación definida anteriormente, como de disparo del inicio de la licuefacción (Rodríguez Pascua, 1977).

Para clasificar el potencial de licuefacción en función del factor aceleración máxima se analizó la información de los registros instrumentales (sismoscopios y acelerógrafos) obtenidos durante el terremoto de 1977 de San Juan, aportados por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica de la Provincia de San Juan (INPRES). Los registros instrumentales confirman un patrón de respuestas que varían de bajas a altas, desde el sector proximal al distal del abanico aluvial del río San Juan (Figura 2b).

En la Figura 2b se han representado las curvas de aceleración instrumental máxima más probable para un periodo de 50 años, según INPRES (1982). Con estos datos se pudo asignar un valor 9 (color rojo) a los depósitos del sector proximal-medio del abanico aluvial del río San Juan, con aceleraciones mayores a 0,35 g. Un valor 7 (color anaranjado) a los depósitos del sector medio del abanico, con aceleraciones comprendidas entre 0,30 y 0,35g. A los depósitos del sector distal del abanico se le asignó un valor 5 (color amarillo) con aceleraciones máximas inferiores a 0,30 g (Figura 2b).

La ubicación y buzamiento de las fallas con actividad tectónica cuaternaria en el área de Precordillera (Pre-Andes de San Juan) permitió inferir que los niveles más altos del movimiento del terreno, tengan mayor probabilidad de producirse en una franja alargada; la que coincide con las zonas del abanico aluvial y de transición. En la Figura 4a, las manifestaciones de licuefacción de los sismos históricos se identifican por medio de sus respectivos radios de influencia con color rojo, amarillo y verde, para los 200, 150 y 70 km respectivamente. Las fallas activas se indican con trazos continuos de color rojo. Los niveles del movimiento en la mayor parte de la planicie aluvial, no serían tan elevados como en el caso anterior, aunque los depósitos de suelos de la planicie aluvial amplifiquen los movimientos del terreno, más que los del abanico.

3.1.3 Factor Profundidad del Nivel Freático

El nivel estático del agua es un factor imprescindible al momento de evaluar la susceptibilidad a la licuefacción ya que el proceso ocurre en ambiente saturado. Para clasificar el potencial de licuefacción en función del factor profundidad del nivel freático se han analizado los planos de isobatas más superfi-

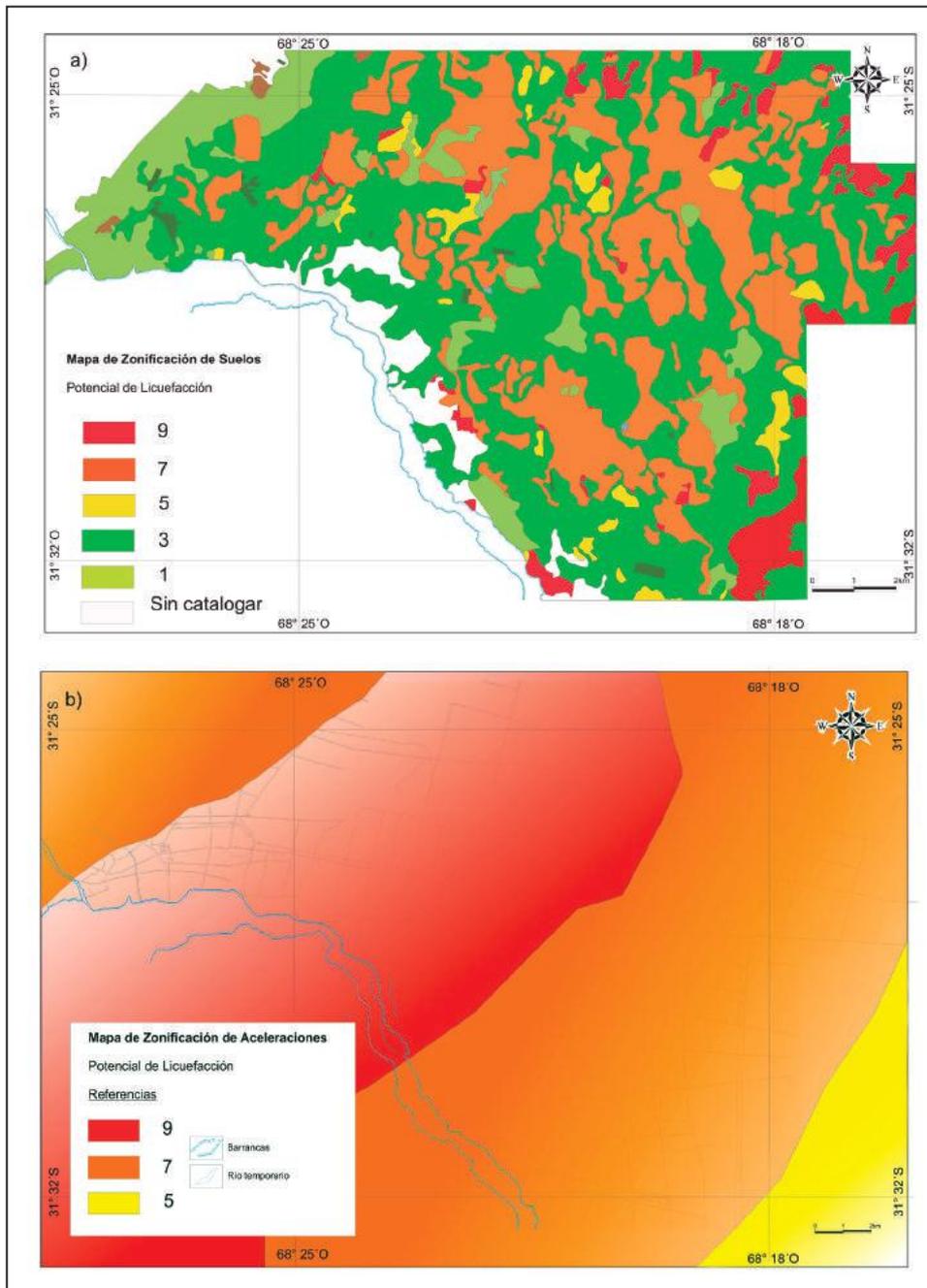


Figura 2 a. Mapa de suelos: muestra la clasificación de 9 a 1 de mayor a menor potencial de licuefacción; b. Mapa de aceleraciones máximas: muestra la clasificación de mayor a menor de 9 a 1 del potencial de licuefacción.

ciales, correspondiente a los meses más críticos del año 2014, según datos del departamento Hidráulica. Los intervalos de profundidad del nivel freático considerados para clasificar el potencial de licuefacción, se basaron en el estudio de Tinsley *et al.* (1985). Esto permitió asignarle un valor 9 (color rojo) a los niveles freáticos menores a -3,0 m. Un valor 7 (color anaranjado) a las isobatas comprendidas entre -3,0 y -5,0 m. Los valores 5, 3 y 1 correspondientes a los niveles freáticos comprendidos entre -5,0 y -10,0 m;

entre -10,0 y -15,0 m y menores a -15 m respectivamente, no se reconocieron en la zona de trabajo (Figura 3a).

Los resultados obtenidos permiten deducir el siguiente comportamiento estacional de las freáticas: Cuando el origen es el exceso de riego, los niveles no se mantienen estables en el tiempo, sino que por el contrario son muy dinámicos y fluctúan durante la temporada. A partir del mes de septiembre, donde comienza a incorporarse el riego

artificial en la red, los niveles freáticos comienzan a ascender paulatinamente. Luego, en la medida en que se avanza en la temporada (setiembre–octubre) se producen los mayores ascensos. En cambio, en el periodo estival, de gran consumo de agua para los cultivos, los niveles comienzan a descender, aproximadamente desde mediados de noviembre hasta marzo. De igual modo, al suspenderse el suministro del agua en los canales de riego (junio-julio) los niveles se profundizan aún más. El análisis indica que la mayor parte de los niveles freáticos se encuentran a profundidades menores a los -3,0 m y tenderían a ser más superficiales hacia las zonas bajas, sitios en que el tiempo de residencia de las aguas tendería a ser menor y por ende, percolarían más rápido hacia zonas más profundas.

3.1.4 Factor Edad de los Depósitos Sedimentarios

La resistencia a la licuefacción se incrementa con la edad de los sedimentos. Los depósitos holocenos son los menos resistentes, los sedimentos del Pleistoceno son aún más resistentes, mientras que los depósitos del Pre-Pleistoceno no son susceptibles de presentar licuefacción. La evaluación del potencial de licuefacción según el factor edad de los depósitos se corresponde con el valor 9, ya que todos los depósitos que conforman el abanico aluvial del río San Juan son atribuidos al Holoceno (Figura 1b).

3.1.5 Factor Licuefacción Histórica

Las manifestaciones superficiales de licuefacción tales como conos de arena, grietas y hundimientos del terreno se generaron al norte y este del río San Juan durante todos los eventos sísmicos ocurridos en la región. La zona situada al oeste está conformada en su mayoría por sedimentos gruesos (sector más proximal del abanico) menos susceptibles a licuar. Los mayores daños relacionados a estos procesos se limitaron a los núcleos urbanos y a las zonas agrícolas ubicadas al noreste del río San Juan (Figura 3b).

3.1.6 Factor Magnitud/Distancia Epicentral

A base de registros históricos se pudo establecer la relación entre la magnitud de un sismo con la distancia epicentral para generar procesos de licuefacción. Se asignó un valor 9 a los sismos de

magnitudes mayores a 7,5 que generan licuefacción en un radio de influencia superior a 260 km. Un valor 7, a sismos de magnitudes entre 7,0 y 7,5, que generan licuefacción en un radio entre 150 a 260 km. Un valor 5 a los sismos de magnitudes entre 6,5 a 7, para un radio de influencia entre 70 a 150 km. Un valor 3, para sismos de magnitudes entre 6 y 6,5 en un radio de influencia entre 50 a 70 km. Un valor 1, para los sismos menores a 6,0, en un radio de influencia menor a 50 km. En la Figura 4a se ubicaron los epicentros de los terremotos históricos. Las manifestaciones de licuefacción de los sismos históricos se identificaron por medio de sus respectivos radios de influencia con colores rojos, amarillos y verdes para los 200, 150 y 70 km. Las fallas activas se indican con trazos continuos de color rojo. La ubicación de los epicentros y la magnitud de los sismos de la figura mencionada fueron tomadas de Alvarado & Beck (2006). Los registros históricos han mostrado que el terremoto de 1894 ($M_s=7,6$) generó estructuras de licuefacción a más de 150 km y el terremoto de 1977 ($M_w=7,5$) hasta 260 km del epicentro. La distribución de los sismos con magnitudes mayores a 5 se muestran en la Figura 4b. En el mapa se identifican con círculos celestes, amarillos y rojos los sismos comprendidos entre 5 - 5,3; 5,3 - 6 y 6 - 7,4 respectivamente.

La clasificación de los factores evaluados se muestra en la Tabla 1 y la matriz de susceptibilidad se muestra en la Tabla 2. Las celdas en blanco indican susceptibilidades observadas en el área de estudio (Factores evaluados). Celdas en rojo y anaranjado son las susceptibilidades inferidas según la metodología, (MA) rojo-Muy alta, (A) anaranjado-Alta).

4 Ponderación de los Mapas Zonificados

Para obtener el índice de susceptibilidad (IS), se ponderaron los mapas zonificados mediante un coeficiente que representa su porcentaje de influencia en el mapa de susceptibilidad final. Estos valores se obtuvieron luego de superponer los mapas vinculados a los distintos factores, hasta conseguir una relación que vincule las zonas consideradas potencialmente licuables, con las zonas de alta susceptibilidad.

Los valores de los coeficientes de la Ecuación (1) que mejor modelan la susceptibilidad de la

Propuesta Metodológica para el Análisis de la Licuefacción de Suelos
Asociada a Sismos Destructivos. Pre-Andes Centrales, Argentina (31° 30' S y 68° 25' O)
Silvia Beatriz Palacios; Laura Patricia Perucca; Ana Pantano & Gabriela Lara

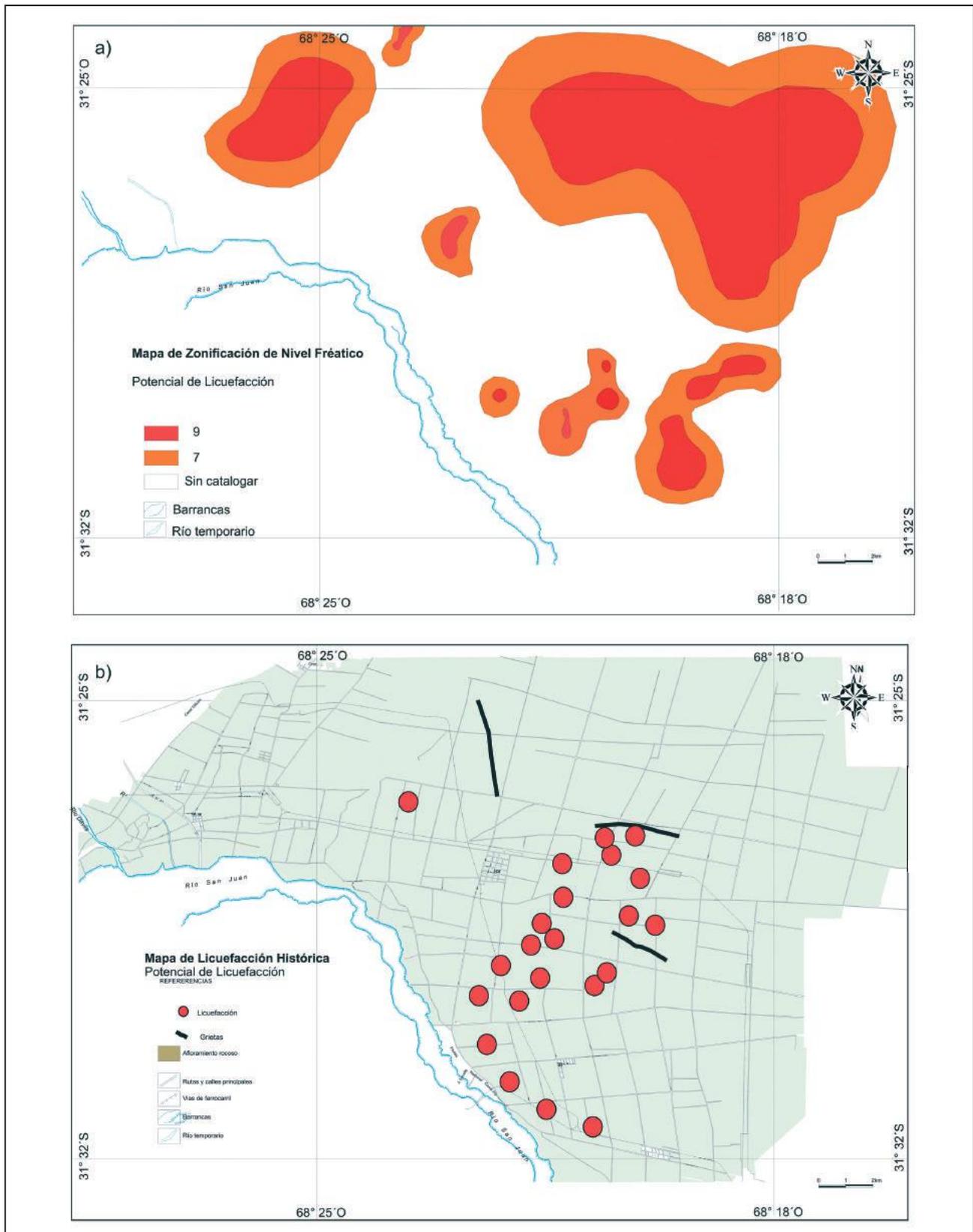


Figura 3 a. Mapa de niveles freáticos: muestra la clasificación de mayor a menor de 9 a 1 del potencial de licuefacción; b. Mapa de licuefacción histórica: los círculos en rojo indican manifestaciones de la licuefacción (volcanes de arena) las líneas en negro indican grietas en el suelo.

**Propuesta Metodológica para el Análisis de la Licuefacción de Suelos
Asociada a Sismos Destructivos. Pre-Andes Centrales, Argentina (31° 30' S y 68° 25' O)**
Silvia Beatriz Palacios; Laura Patricia Perucca; Ana Pantano & Gabriela Lara

| C l a s i f i c a c i ó n | Origen y Granulometría de los Depósitos | | | | Profundidad del Nivel Freático | Edad del Depósito | Magnitud/ Distancia Epicentral | | Aceleración Máx. Instrumental (g) | Licuefacción histórica |
|---|---|---|--|---|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|---|-----------------------------------|------------------------|
| | Origen / Tipo de Depósitos | Granulometría / Profundidad | Tipos de suelos (Distribuidos en todo Elabánico) | Características Texturales del Suelo | | | Terremotos de Magnitud (MW) | Genera Licuefacción en un Radio de (Km) | | |
| 9 | Depósitos aluviales del abanico del río SJ. | Proximal-medio: hacia el E del sector, capas de arena con espesores superiores a los 3m, a 3m de profundidad. | Serie C. Puntilla (Cp) Serie Pie de Palo (Pp) | (Cp) Textura franco arenosa a arenosa. (Pp) Textura Franco arenosa a arenosa. | < 3,0m | Holoceno | > 7,5 | > 260 | > 0.35 | Licuefacción histórica |
| 7 | Depósitos aluviales del abanico del río SJ | Medio: Capas de arena con espesores entre 3 y 25m, a veces intercaladas con arcillas. Profundidad de las arena en su mayoría por debajo de los 30 m y las menos entre 3 y 20m | Serie Belgrano (Be) | (Be) Franco arenosa, areno franco y arenosa Subsuelo franco limosa, franco arcillo limoso, franco arcillosa o arcillosa respectivamente. | 3,0 - 5,0m | Holoceno | 7 a 7.5 | 150 a 260 | 0,30 a 0,35 | Licuefacción histórica |
| 5 | Depósitos aluviales del abanico del río SJ | Distal: Capas de arenas con espesores entre 10 y 60m, a profundidades superiores a los 30m | Serie Sarmiento (St) | (St) Areno franco a franco arenosa. Subsuelo arcilloso limosa a franco arcillosa. | 5,0 - 10,0m | Holoceno | 6,5 a 7 | 70 a 150 | <0,30 | Sin registros |
| 3 | Depósitos aluviales del abanico del río SJ | ----- | Serie Mitre (Mi) | (Mi) Franco arcilloso, Franco arcilloso limoso a arcilloso, subsuelo arenoso a franco arenosa. | 10,0 - 15,0m | Holoceno | 6 a 6.5 | 50 a 70 | ----- | ----- |
| 1 | Depósitos aluviales del abanico del río SJ | ----- | Complejo El Salado (Co) Serie Cortinez (Cz). | (Co) Distintas texturas sobre un subsuelo de gravas, gravillas o rodados. (Cz) Textura arcillosa, franco arcillo-limosa o limosa. Subsuelo varía entre arenosa a francoarenosa. | > 15,0m | Holoceno | < 6 | < 50 | ----- | ----- |

Tabla 1 Clasificación de los factores evaluados

zona son: a=20%; b=20%; c=30%; d=30%. El resultado de esta ponderación se denomina índice de susceptibilidad (IS), que se expresa en la Ecuación (1) como:

$$IS = a \times G \times O + b \times AM + c \times NF + d \times LH \quad (1)$$

G y O = granulometría y origen del depósito

AM = aceleración máxima

NF = profundidad de la freática

LH = Licuefacción histórica

a, b, c, d = coeficientes

El valor del índice de susceptibilidad (IS) fue redondeado al entero más cercano e interpretado cualitativamente, resultando: IS= 9-8 (SMA); IS=7-6 (A); IS=5-4 (M); IS=3-1 (B), las que indican susceptibilidades Muy Altas, Altas, Moderadas y Bajas respectivamente (Tabla 3).

Como resultado de la superposición de los mapas zonificados sobre la grilla se obtuvo en cada celda un número comprendido entre 13 y 32, los que se agruparon en distintas categorías. A los

**Propuesta Metodológica para el Análisis de la Licuefacción de Suelos
Asociada a Sismos Destructivos. Pre-Andes Centrales, Argentina (31° 30' S y 68° 25' O)**
Silvia Beatriz Palacios; Laura Patricia Perucca; Ana Pantano & Gabriela Lara

| | Descripción | Gran Y Ori. (30%) | (IS) según el NF (30%) | | | | | Susceptibilidad | | | | | Aceleración máx. 20% | | | L.H (30%) |
|------------------------|---|-------------------|------------------------|---------|----------|-----------|---------|-----------------|---------|----------|-----------|---------|----------------------|---------------|-----------|-----------|
| | | | <3 (9) | 3-5 (7) | 5-10 (5) | 10-15 (3) | >15 (1) | <3 (9) | 3-5 (7) | 5-10 (5) | 10-15 (3) | >15 (1) | >0,35 (9) | 0,35- 0,3 (7) | <0,30 (5) | |
| Abanico Aluvial | Depósitos del abanico aluvial-Sector Proximal-medio | 9 | 9 | 7 | --- | --- | --- | SMA | SA | --- | --- | --- | 9 | 7 | 5 | 9 |
| | Depósitos del abanico aluvial-Sector Medio | 7 | 9 | 7 | --- | --- | --- | SMA | SA | --- | --- | -- | 9 | 7 | 7 | 9 |
| Abanico Aluvial | Depósitos del abanico aluvial Sector Distal | 5 | 9 | 7 | --- | --- | --- | SMA | SA | --- | --- | --- | 7 | 5 | 5 | 7 |

Tabla 2. Matriz de susceptibilidad a la licuefacción. Las celdas en blanco indican susceptibilidades observadas en el área de estudio (Factores evaluados). Celdas en rojo y anaranjado son las susceptibilidades inferidas según la metodología, rojo-Muy alta (MA), anaranjado-Alta (A).

| INDICE | SUSCEPTIBILIDAD |
|--------|-----------------|
| 9-8 | MUY ALTA |
| 7-6 | ALTA |
| 5-4 | MODERADA |
| 3-1 | BAJA |

Tabla 3 Susceptibilidad asignada según los índices de susceptibilidad.

rangos entre 28-32, se les asignó susceptibilidad Muy Alta (SMA), entre 23-27 Alta (SA); entre 18-22 Moderada (SM) y entre 13-17 Baja (SB), asociados al color rojo, anaranjado, amarillo, verde claro y verde oscuro respectivamente. En mapa final de susceptibilidad de licuefacción, se asignó el color rojo a la susceptibilidad muy alta (SMA), color anaranjado a susceptibilidad alta (SA), amarillo a susceptibilidad moderada (SM) y verde a susceptibilidad baja (SB). Lo expuesto se sintetiza en el mapa de susceptibilidades (Figura 5), con colores rojo, anaranjado, amarillo y verde, se identifican los distintos grados de susceptibilidades en muy alta, alta, moderada y baja respectivamente.

5 Discusión

5.1 Consideraciones Respecto a los Factores

La evaluación de la susceptibilidad se realizó completamente a partir del análisis de los

factores señalados anteriormente, solamente los factores profundidad del nivel freático, magnitud/distancia epicentral y aceleración máxima son relativamente independientes del resto. No se evaluaron los factores densidad y peso del recubrimiento por no contar con datos suficientes. El factor granulometría se incluyó en el factor suelo/textura por considerar que la granulometría es la que realmente influye en la susceptibilidad a la licuefacción final. No existe una relación directa entre el nivel freático con el resto de los factores, sin embargo es fácil percatarse que la granulometría y densidad del suelo pueden afectar el nivel de agua en periodos cortos de tiempo, ya sea por una perturbación en la profundidad del agua subterránea (por bombeo de agua, ensayos de permeabilidad, etc.) El factor densidad se relaciona con la edad de los sedimentos, mientras más antiguos los depósitos, más densos (debido a los procesos de cementación y litificación que compactan los granos con el paso del tiempo) y viceversa. El peso del recubrimiento y profundidad del suelo, en donde se puede estimar que la densidad relativa de los depósitos, se incrementa con la profundidad. Esto se debe a que el esfuerzo total ejercido sobre los depósitos es mayor con la profundidad, incrementando el roce entre partículas. La combinación de estos factores incrementa la resistencia a la licuefacción.

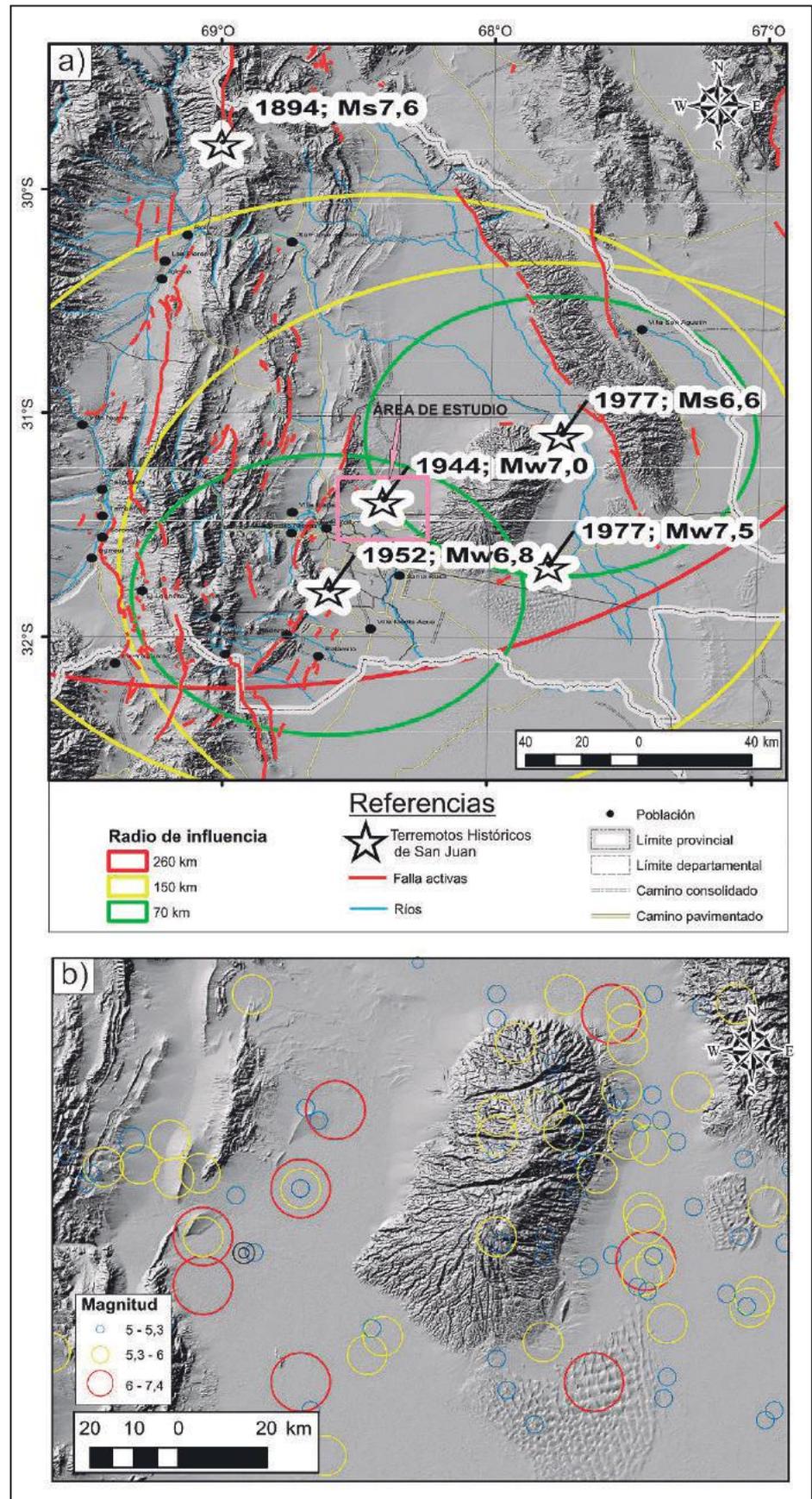


Figura 4 a. Imagen con la ubicación de los epicentros de los terremotos históricos. Las manifestaciones de licuefacción de los sismos históricos se identifican por medio de sus respectivos radios de influencia con colores rojos, amarillos y verdes para los 200, 150 y 70 km. Las fallas activas se indican con trazos continuos de color rojo; b. En el mapa se identifican con círculos celestes, amarillos y rojos los sismos comprendidos entre 5 - 5,3; 5,3 - 6 y 6 - 7,4 respectivamente.

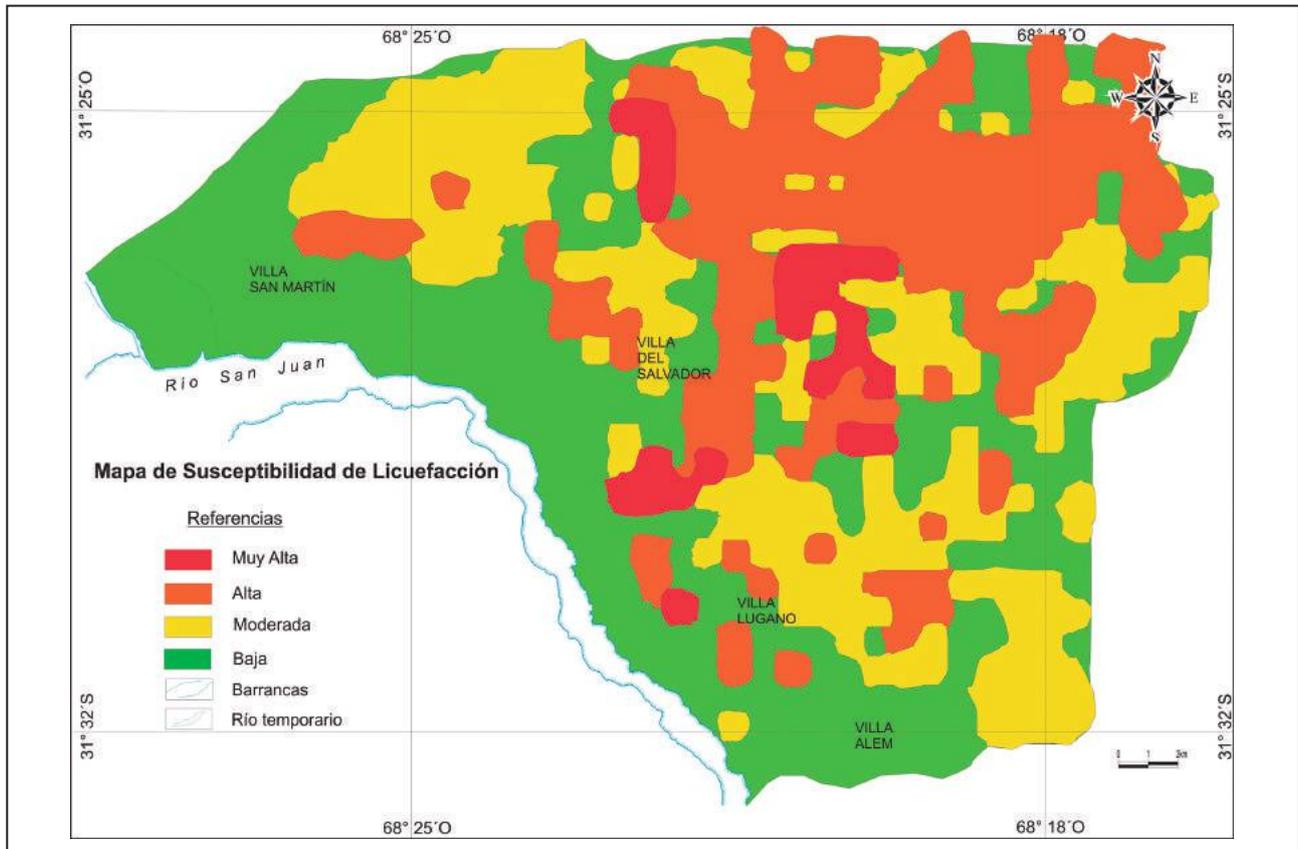


Figura 5 Mapa de susceptibilidad de licuefacción; con color rojo, anaranjado, amarillo y verde, se identifican los distintos grados de susceptibilidades, los que se corresponden con susceptibilidades muy alta, alta, moderada y baja respectivamente.

5.1.1 Magnitud/Distancia Epicentral

Se consideró independiente del resto de los factores analizados. En este trabajo no se ponderó este parámetro, al considerar a toda la zona de estudio altamente susceptible por encontrarse emplazada muy próxima a fallas con actividad tectónica cuaternaria.

5.1.2 Aceleración Máxima

No existe relación directa entre la amplitud de vibración y los demás factores, por lo que fue considerado independiente del resto. Sin embargo las metodologías utilizadas llevan implícita la variable edad del depósito y en cierta forma tipo de depósito. Los depósitos del sector medio-distal del abanico amplifican los movimientos más que los del sector proximal.

5.1.3 Licuefacción Histórica

La revisión de documentos históricos es la primera fuente para conocer zonas con susceptibilidad *a priori* de presentar licuefacción inducido por

sismo. Este factor se considera íntimamente relacionado con todos los factores.

5.1.4 Factor Aceleración de la Gravedad

Se interpretaron y extrapolaron los estudios de microzonificación sísmica del valle de Tulum realizados por el INPRES (1982). Se pudo estimar las características sísmicas del área de estudio mediante un análisis de las aceleraciones gatillantes. Es posible que los valores asignados deban ajustarse en algunos casos, debido a que toda la zona de estudio se corresponde con el abanico aluvial del río San Juan, por lo que la respuesta de los suelos a las vibraciones es muy similar en todos los sectores. A pesar de ello, la metodología usada es la misma que se aplica indirectamente para evaluar el potencial de licuefacción en estudios geotécnicos de la ingeniería civil.

5.1.5 Factor Edad de los Depósitos

La edad asignada a los depósitos del abanico aluvial del río San Juan es holocena.

5.1.6 Factor Nivel Freático

La división en intervalos de la profundidad del nivel freático se adaptó al área de estudio, teniendo en cuenta la baja profundidad de las aguas subterráneas.

6 Consideraciones Respecto a las Ponderaciones

El grado de susceptibilidad a la licuefacción obtenido a partir de los índices de susceptibilidad (IS) depende en gran medida del porcentaje de influencia de cada factor en el proceso. Se recomienda que tanto la ponderación del factor nivel freático, granulometría, origen del depósito y licuefacción histórica nunca sea inferior al 30%, debido a que éstos son imprescindibles para evaluar la susceptibilidad a la licuefacción. Para estudios más detallados se sugiere incluir ensayos de mecánica de suelos, no aplicados en esta etapa preliminar del trabajo.

Con respecto a la sectorización del abanico aluvial del río San Juan, el contacto entre los distintos sectores de los depósitos del abanico aluvial del río San Juan (sector proximal-medio, medio y distal) es estimativo ya que no se tiene información granulométrica suficiente que permita establecer el límite preciso entre los distintos sectores. Los datos granulométricos se obtuvieron de pozos de sondeo, lo que permitió las descripciones granulométricas.

7 Evaluación del Peligro Potencial de Licuefacción

Las tareas tendientes a evaluar el potencial de licuefacción en el área de estudio, tienen por finalidad obtener un mapa de zonificación final, el que constituye la expresión más sintética de los resultados de esta investigación. La metodología empleada buscó dar un sustento teórico basado principalmente en pautas generales de comportamiento de los factores que influyen en el potencial de licuefacción.

El aplicar un método de superposición de mapas para obtener las susceptibilidades, permitió observar que al modificar la ponderación de uno de los factores, la zonificación de la susceptibilidad no cambia solamente en un sitio particular, sino que afecta a toda el área de estudio, lo que permite distribuir de manera óptima las zonas desde muy Alta a Baja susceptibilidad.

Con respecto a los valores asignados para clasificar la susceptibilidad a la licuefacción de los distintos factores, se tomaron números impares del 1 al 9. Sin embargo, algunos valores asignados no se corresponden con la zona específica de trabajo, caso de profundidad del nivel freático, ya que éstos en su mayoría se encuentran a una profundidad inferior a los -5,0 m y los de profundidad mayor a -10 m se encuentran fuera del área de estudio.

Con respecto a los índices de susceptibilidad (IS), en este trabajo los números obtenidos están redondeados al número entero más próximo, estos valores podrían ser más precisos en estudios próximos.

8 Conclusiones

La susceptibilidad de licuefacción fue modelada utilizando los siguientes Factores: 1) Origen de depósitos, 2) Granulometría, 3) Nivel freático, 4) Edad de los depósitos, 5) Magnitud/distancia epicentral, 6) Aceleración máxima y 7) Licuefacción histórica.

En este trabajo se propone evaluar y ponderar otros factores además de los reconocidos, como por ejemplo el de Licuefacción histórica, Magnitud/Distancia epicentral, Tipo de Suelo/Textura (este último se incluyó en el factor Granulometría). La incorporación de estos parámetros a los factores básicos, permitió una zonificación de la susceptibilidad a la licuefacción en el área de estudio más completa y certera.

La metodología propuesta resultó eficaz para cumplir con los objetivos del estudio, sin embargo, puede ser perfeccionada en futuros trabajos. Para ello se recomienda establecer un criterio que permita además relacionar la edad, densidad y peso del recubrimiento ya que son factores interdependientes.

El uso del mapa de suelos resultó muy útil al momento de ponderar el factor granulometría del depósito. Se podría refinar el criterio con ensayos de granulometría para cada depósito y/o zona de interés (estratos licuables, superficies con evidencias de licuefacción).

El método alternativo propuesto para la evaluación de la amplitud de vibración mediante aceleraciones gatillantes resultó adecuado, aunque

igualmente se recomienda contar con mapas de amplificaciones sísmicas para futuros estudios.

Para la zona de estudio, los ascensos del nivel freático por recargas del río San Juan hace que el agua infiltre en profundidad. La mayor parte de las zonas pobladas se ubican en áreas catalogadas de Alta a Muy alta susceptibilidad, debido principalmente a la baja profundidad del nivel freático, en su mayoría inferior a -5m. Esto hace que la zona oriental del abanico aluvial del río San Juan sea altamente susceptible a los procesos de licuefacción de suelos (PLS).

El mapa de licuefacción final muestra que las zonas con susceptibilidades muy Alta y Alta coinciden con los sitios de meandros abandonados, los que están constituidos por material arenoso, granulometría considerada muy susceptible a la licuefacción.

Con los resultados obtenidos se confeccionó un mapa de potencial de licuefacción que muestra zonas de susceptibilidad Muy Alta, Alta, Moderada y Baja. La zona de muy alta susceptibilidad encierra el área de suelos aluviales y generalmente se corresponde con las áreas de cultivo y algunos centros poblados. Las zonas de baja a moderada susceptibilidad se corresponden con las zonas de suelos granulares gruesos y freáticas por debajo de los -5 m de profundidad. Las zonas de susceptibilidad alta se corresponden con las zonas de transición entre las dos primeras. La zona de muy alta susceptibilidad sirve para representar un nivel general del peligro potencial. La muy alta probabilidad de licuefacción en un sitio dentro de esta zona está condicionada a que en él existan suelos arenosos saturados al momento del sismo. Es de esperar que dentro de la zona de alto peligro puedan existir algunos sitios particulares que posean un bajo peligro de licuefacción debido a la presencia de suelos densos o arcillosos. Estas áreas pueden ser identificadas mediante relevamiento de suelos más detallados y estudios *in situ*.

Las mayores susceptibilidades se obtuvieron en primer lugar en el sector proximal-medio y medio del abanico. En términos geográficos las áreas más susceptibles a la licuefacción son las zonas rurales dedicadas al sector agrícola, las zonas urbanas de Villa San Isidro, Villa San Martín (ubicadas en la parte distal del abanico) y las menos susceptibles se corresponden con la zona del sector proximal del

abanico, en donde se desarrolla la principal actividad industrial del departamento Albardón.

Se espera que este trabajo se pueda incorporar al planeamiento urbanístico en el ámbito regional y local de la prevención de los peligros como criterio básico, en el sector norte del valle del Tulum y que la metodología aplicada resulte útil en futuros estudios, en zonas igualmente sísmicas y con características geológicas similares.

9 Agradecimientos

La presente contribución fue financiada con fondos del Programa Permanente del Gabinete de Neotectónica y Geomorfología INGENIO de la UNSJ. Los autores agradecen a los revisores por sus sugerencias y comentarios que contribuyeron a mejorar este trabajo.

10 Referencias

- Alvarado, P. & Beck, S. 2006. Source characterization of the San Juan, Argentina crustal earthquake of 15 January 1944 (Mw 7.0) and 11 June 1952 (Mw 6.8). *Earth and Planetary Science Letters*, 243(3-4): 615-631.
- Ambraseys, N. 1988. Engineering seismology: earthquake engineering and structural dynamics. *Journal of the International Association of Earthquake Engineering*, 17: 1-105.
- Amick, D.; Gelinis, R.; Maurath, G.; Cannon, R.; Mot, D.; Billington, C. & Kemppinich, H. 1990. *Paleoliquefaction features along the Atlantic Seaboard*, U.S. Nucl. Regul. Comm. Rep. NUREG/CR-5613, 146 p.
- INPRES. 1982. Microzonificación sísmica del Valle del Tulum. Provincia San Juan. Informe Técnico General, II, 50 p. San Juan-Argentina.
- INTA. 1976. Estudio de suelos y drenaje del Valle de Tulum. Secretaría de Estado de Recursos Hídricos. Tomos I y II. Gobierno de San Juan.
- Kramer, S. & Stewart, J. 2004. Geotechnical aspects of seismic hazards. In: BOZORGNIA, Y. & BERTERO, V.(eds.). *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*. London. United Nations Environmental Program (2003). GEO Latin America and the Caribbean Environment Outlook, p. 143-178.
- Obermeier, S.F.; Jacobson, R.B.; Smoot, J.P.; Weems, R.; Gohn, G.; Monroe, J. & Powars, D. 1990. Earthquake-induced liquefaction features in the coastal setting of South Carolina and the fluvial setting of the New Madrid fault zone. *U.S. Geological Survey, Professional Paper*, 1504.
- Obermeier, S.; Martin, J.R.; Frankel, T.; Munson, P.; Munson, C. & Pond, E. 1993. Liquefaction evidence for one or more strong Holocene earthquakes in the Wabash valley of southern Indiana and Illinois. *US Geological Survey Professional Paper*, 1536: 27 p.
- Obermeier, S.F.; Jacobson, R.B.; Smoot, J.P.; Weems, R.F.;

**Propuesta Metodológica para el Análisis de la Licuefacción de Suelos
Asociada a Sismos Destructivos. Pre-Andes Centrales, Argentina (31° 30' S y 68° 25' O)**
Silvia Beatriz Palacios; Laura Patricia Perucca; Ana Pantano & Gabriela Lara

- Gohn, G.S.; Monroe, J.E. & Powars, D.S. 1990. Earthquake-induced Liquefaction Features in the Coastal Setting of South Carolina and in the Fluvial Setting of the New Madrid Seismic Zone, *U.S. Geological Survey. Professional Paper, 1504*: 44 p.
- Palacios, S.B. 2015. *Peligros geológicos asociados a sismos destructivos al norte del río San Juan. Provincia San Juan. Argentina*. Inédito. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Universidad Nacional de San Juan. 220 p.
- Rodríguez Pascua, M. 1997. *Paleosismicidad en Emplazamientos Nucleares. Estudio en Relación con el Cálculo de Peligrosidad Sísmica*. Colección Otros Documentos, Consejo de Seguridad Nuclear: 286 p. Madrid.
- Tinsley, J.C.; Youd, T.L.; Perkins, D.M. & Chen, H.T.F. 1985. Evaluating liquefaction potencial. evaluating earthquake hazards in the Los Angeles region-An Earth-Science Perspective. In: ZIONYED, J.I.(ed.). *U.S. Geological Survey Professional Paper, 1360*.
- Tuttle, M. 1990. Liquefaction and ground failure induced by the 1988 Saguenay, Quebec, earthquake. *Can Geotech. Journal, 27*:580–589.
- Wyllie, L.A. 1986. The Chile earthquake of March 3, 1985. *Earthquake Spectra, 2*:249–506.
- Wyllie, L.A. & Filson J.R. 1989. Armenia earthquake reconnaissance report. *Earthquake Spectra, 155* p.
- Yasuda, S. & Tohno I. 1988. Sites of liquefaction caused by the 1983 Nihonkai-Chubu earthquake. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 28*(2):61–72.
- Yegian, M.K.; Yee, Z. & Harb, J. 1995. Liquefaction during the 1990 Manjil, Iran, earthquake, I: case history data. *Bull. Seismol. Soc. Am., 85* (1):66–82.
- Youd, T.L. & Perkins, D.M. 1987. Mapping of liquefaction severity index. *Journal Geotech Eng., 113*(11):1374–1392.