



Hacia una zonificación de susceptibilidad geológico - geotécnica de las obras y proyectos de presas en la Argentina

Alejandro Emmanuel CELLI¹, Carlos Alberto DI SALVO¹, José Luis VERGA¹, Aitor PORCEL LABURU¹, Juan Pablo GUERRA¹ y Lucía Anahí ÁLVAREZ¹

¹Departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional.

Email: acelli@frba.utn.edu.ar; carlosalbertodisalvo@gmail.com; arqjlv@yahoo.com.ar; aitor.porcel@hotmail.com; juanpiguerra600@gmail.com; luciaa494@yahoo.com.ar.

Editor: Diego A. Kietzmann

Recibido: 7 de septiembre de 2020

Aceptado: 5 de noviembre de 2020

RESUMEN

La mayor incertidumbre en todo gran proyecto de ingeniería está asociada al comportamiento del terreno, sumado a una necesidad creciente de construir nuevas presas en sitios con condiciones geológicas cada vez más complejas. Tomando conciencia de este desafío, se propone entonces abordar el manejo de la incertidumbre en forma sistemática, avanzando sobre paso seguro, sin prescindir de ninguna de las etapas clásicas de un proyecto. El presente trabajo se encuadra en lo que podríamos denominar una etapa de inventario en el desarrollo del conocimiento. A partir de la recopilación de documentación referente a las presas construidas y proyectadas en la República Argentina, sumada a un análisis general de las características geológicas, geotécnicas, sismológicas y estructurales del territorio nacional, se presenta una clasificación de presas, en función de su susceptibilidad a sufrir situaciones complejas en su terreno de fundación y área de embalse. Este proceso permite elaborar un primer *ranking* de aprovechamientos prioritarios, que merecen especial atención, ya sea en su inspección y mantenimiento (presas ejecutadas) o ya sea una mayor inversión en estudios básicos, durante las etapas previas a su licitación (presas proyectadas). Se identifican a su vez regiones dentro del territorio nacional, cuyas características geotécnicas justifican avanzar en el conocimiento hacia una etapa de prefactibilidad.

Palabras clave: Represas, Sistemas de Información Geográfica, Inventario, Peligrosidad, Fundaciones.

ABSTRACT

Towards a geological and geotechnical susceptibility zoning of dam works and projects in Argentina.

The biggest uncertainty in any major engineering project is associated with the ground behavior, coupled with a growing need of building new dams on sites with increasingly complex geological conditions. Being aware of this challenge, it is then proposed to address the uncertainty management in a systematic way, without neglecting any of the classic stages of a project. The present work is framed in what we could call an inventory stage in knowledge development. Starting from a document compilation of built and projected dams in Argentina, coupled with a general analysis of the geological, geotechnical, seismological and structural characteristics of the national territory, a preliminary classification of dams is presented, associated to its susceptibility to suffer complex situations in its foundation and reservoir area. This process allows the development of a first ranking of priority exploitations, which deserve special attention, either in their inspection and maintenance (executed dams), or a greater investment in basic studies, during the pre-tendering stages (projected dams). A series of regions within the national territory are identified, whose geotechnical characteristics justify moving forward in knowledge towards a prefeasibility stage.

Keywords: *Hydro Projects, Geographic Information System, Inventory, Hazard Risk, Foundations*

INTRODUCCIÓN

La creciente expansión demográfica a nivel global, obliga cada vez más a ocupar territorios históricamente relegados, debido a su complejidad geotécnica y su comportamiento difícilmente predecible. Las obras de infraestructura crítica, como las grandes presas de embalse, deben acompañar el crecimiento que conlleva necesariamente, a corto o mediano plazo, a aceptar el desafío de afrontar las dificultades geológico - geotécnicas de terrenos inestables. Este aspecto adquiere especial relevancia en la Declaración Mundial sobre Seguridad de Presas, promulgada recientemente por el Comité Internacional de Grandes Presas (ICOLD 2019).

En todo gran proyecto de ingeniería, la mayor incertidumbre gira siempre en torno a aquellos parámetros que no pueden ser abordados desde la lógica estrictamente deductiva (Celli 2015); particularmente, los relacionados al comportamiento del terreno, el cual viene impuesto por la naturaleza y no conoce de normas y especificaciones (ICOLD 2005). Sin embargo, estas incertidumbres se vuelven críticas en aquellos terrenos geotécnicamente complejos (débiles, blandos, inestables, cizallados, solubles, expansivos, dispersivos, licuables, erosionables, etc.), sometidos a condiciones de saturación permanente o cíclica, en un entorno de mayor o menor actividad sísmica y bajo diversas condiciones climáticas.

Se hace evidente entonces la necesidad de establecer una primera aproximación a las características geológicas generales del territorio argentino, con vistas a la detección temprana de potenciales dificultades relacionadas a sus fundaciones y zonas de embalse, que repercutan directamente en los costos de construcción y/o mantenimiento de grandes proyectos hidroeléctricos o multipropósito. No debe perderse de vista, a su vez, que los problemas en la fundación representan la principal causa de rotura de presas de hormigón, y un importante porcentaje en otros tipos de presas (ICOLD 1999).

Trabajos como los editados por González y Bejerman (2004), o el proyecto ANIDA, del Instituto Geográfico Nacional, por citar algunos, constituyen una importante referencia local en este sentido. A nivel internacional, se destaca el mapa geológico ingenieril del *British Geological Survey* (Dearman et al. 2011), así como el conocimiento alcanzado con el ambicioso proyecto *James Bay*, en Canadá (Hayeur 2001).

Se propone entonces abordar el manejo de la incertidumbre en forma sistemática, avanzando sobre paso seguro, sin prescindir de ninguna de las etapas clásicas de un proyecto, en el sentido de Casajús et al. (1982) y de Menéndez Arán et al. (2018), entre otros, de modo de alcanzar la etapa licitatoria

con un riesgo técnico, económico y socioambiental acotado.

Siguiendo esta visión, el presente trabajo intenta encuadrarse en una etapa de inventario geológico, brindando características generales del territorio, que permitan establecer comparaciones entre proyectos y obras semejantes.

En una próxima etapa, se propone avanzar en la elaboración de una base de datos que contenga parámetros geológico – geotécnicos e hidrometeorológicos característicos de cada una de las zonas identificadas, a fin de contribuir en la etapa de diseño y costeo preliminar de obras, posibilitando una estimación más ajustada del diseño de las cimentaciones y excavaciones de nuevos proyectos. Para esta tarea, se está llevando a cabo una intensa recopilación de datos obtenidos de diferentes proyectos de presas.

Se aspira, en futuras etapas, a continuar enriqueciendo esta base de datos con diversos parámetros que excedan a la geología y la geotecnia, siendo de sumo interés contar con indicadores socioambientales.

OBJETIVOS

El presente trabajo expone la necesidad de llevar adelante un inventario de presas proyectadas y ejecutadas, bajo la premisa de evaluar el entorno terreno – obra en su conjunto, a fin de anticiparse a las posibles dificultades que pudiesen surgir en todo proyecto de magnitud, incrementando su seguridad y eficiencia.

Como objetivo general, se pretende establecer un conocimiento referencial, que posibilite el incremento de la seguridad de las poblaciones y del ambiente, afectados directa e indirectamente a la ejecución de obras de importancia capital en el desarrollo estratégico y sostenible de una Nación con elevado potencial hídrico.

En esta primera etapa, se plantea la evaluación de una serie de aspectos generales del terreno, cuya clasificación aproxime, por un lado, a una macrozonificación del territorio nacional en función de su susceptibilidad a presentar complejidades ingenieriles de índole geológico-geotécnicas; y por otra parte, a establecer un *ranking* de obras y proyectos que merezcan un mayor grado de atención, en relación a la profundidad de las investigaciones, tratamientos y auscultación del terreno requeridos, a fin de disminuir tanto la incertidumbre en los costos, como el costo del riesgo, en el sentido de Grunbaum (1989).

Debe tenerse en cuenta que el espíritu de este trabajo apunta a generar una primera idea sobre las características geológico - geotécnicas generales del terreno a la hora de

emprender un proyecto, relegando en futuras etapas el análisis bajo otros enfoques de igual o mayor importancia, como las características del relieve, el tratamiento estadístico de ensayos geotécnicos de campo y laboratorio, o la vida útil de los embalses dada por la carga sedimentaria, entre otros. De igual manera, y por razones de escala, en esta primera fase no se establecen diferenciaciones entre sectores de cierre y embalses. Es claro que un proyecto de estas características jamás podría darse por concluido; de allí su organización en etapas.

Por estos motivos, en ningún caso se fomenta la omisión de investigaciones *in situ*, ya sean generales o particulares, ni mucho menos se plantea lanzar obras a licitación con información regional de este tipo. En este sentido, los autores adhieren a las palabras del Ingeniero José Speziale (1989): “Las omisiones y los errores cometidos en el proyecto o en la construcción, tarde o temprano serán puestos en evidencia por el comportamiento de la obra; ineludiblemente, entonces – ya tarde – habrá que enfrentar las consecuencias; es mejor sin duda ocuparse temprano de asegurar la interacción armónica entre la obra y su medio geotécnico, y en ello reside la importancia (superlativa) de la investigación”.

METODOLOGÍA

Metodológicamente, se plantea un esquema de trabajo secuencial, emulando las etapas de avance en el conocimiento que definen a todo proyecto ingenieril de cierta envergadura. Abarcando una escala de trabajo a nivel de país, el primer paso consiste en establecer una zonificación geológica y geotécnica simplificada del territorio argentino, a modo de etapa de Inventario, con el fin de detectar aquellas regiones con presencia de terrenos potencialmente débiles o inestables.

Para tal tarea, se diseñó un sistema de evaluación de la susceptibilidad del terreno, específico para la etapa en curso, con la premisa de generar índices calculados a partir de datos oficiales, de libre acceso, que no requieran mayor procesamiento, y que a la vez fuesen representativos de los inconvenientes frecuentemente hallados durante un proyecto geotécnico de tales características.

De esta manera, se establecieron criterios geológicos, geotécnicos, sismológicos, neotectónicos y gravitatorios. Cada uno de estos parámetros fue plasmado en un sistema de información geográfica, mediante el uso del *software* libre QGIS 3.12.

En primer término, se elaboró una zonificación geológico-geotécnica del territorio argentino, a partir de la edad de for-

mación de los macizos rocosos y suelos involucrados. Para ello, se tomó como base el mapa geotectónico argentino a escala 1 : 2,500,000 del Sistema de Información Geográfica Ambiental Minera -SIGAM- (2018), reelaborándolo en función de tres categorías de terrenos: cuaternarios (holocenos y pleistocenos), terciarios (neógenos y paleógenos) y preterciarios (mesozoicos, paleozoicos, proterozoicos y arcaicos).

Bajo esta clasificación, fueron diferenciados a grandes rasgos terrenos con diferentes comportamientos geotécnicos: inconsolidados (cuaternarios), macizos rocosos débiles o blandos (terciarios), y macizos rocosos resistentes o duros (preterciarios).

A partir de esta zonificación, se identificaron en el sistema de información geográfica sectores con diferente grado de susceptibilidad a presentar dificultades geológico-geotécnicas (Fig. 1a): susceptibilidad alta, representada en color magenta, para terrenos terciarios; susceptibilidad media, en amarillo, para terrenos cuaternarios; y susceptibilidad baja, en verde, para terrenos preterciarios. A cada sector, se le asignó un índice de susceptibilidad geológico-geotécnica (SG) de 2, 1 y 0, respectivamente.

El criterio adoptado tuvo en cuenta que la mayor cantidad de inconvenientes registrados en obras de este tipo han ocurrido en macizos de rocas débiles, que pueden generar una falsa impresión de seguridad, frente a terrenos inconsolidados, cuyo comportamiento es más sencillo de modelar.

El segundo parámetro adoptado para el cálculo de la susceptibilidad del terreno, se relaciona con un factor altamente condicionante para el diseño de presas de embalse, que es la presencia de rocas solubles en la fundación y/o en el vaso.

Para su evaluación, se tomó como base el mapa de fajas litogenéticas a escala 1 : 2,500,000 del Sistema de Información Geográfica Ambiental Minera (2018), extrayendo aquellos elementos que representan rocas evaporíticas (Fig. 1b).

De esta manera, se le asignó un índice de susceptibilidad geológico-geotécnica a la disolución de 2, para aquellas zonas con presencia de rocas evaporíticas, frente a un índice de susceptibilidad geológico-geotécnica nulo, en caso contrario.

Un tercer aspecto adoptado, se refiere al registro de procesos de remoción en masa, que pudiesen afectar la zona de implantación de las presas y/o sus embalses. Para cuantificar este parámetro, se adaptó el índice de magnitud máxima adoptado por el Sistema Nacional de Gestión Integral del Riesgo -SINAGIR- (2018), estableciendo un índice de susceptibilidad a la remoción en masa (SR), con valores de 2, 1 y 0, equivalentes, respectivamente, a los rangos de Sistema Nacional de Gestión Integral del Riesgo de 24-44, 0-24 y 0 (Fig. 1c).

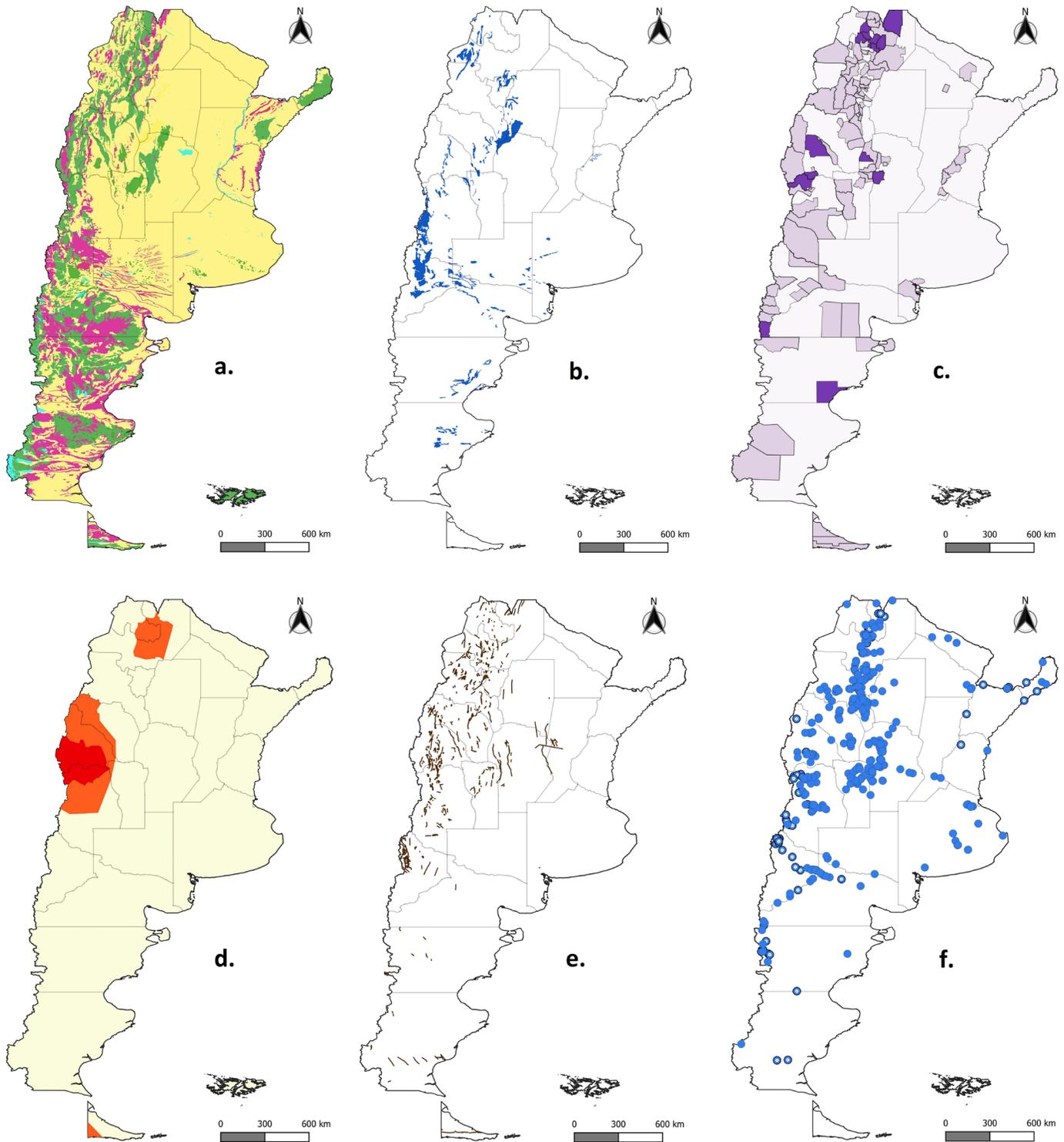


Figura 1: Mapas temáticos utilizados como base para la caracterización de susceptibilidad del terreno de fundación de presas proyectadas y ejecutadas en la República Argentina. a) Mapa geológico – geotécnico simplificado, destacando en amarillo los terrenos cuaternarios (holocenos y pleistocenos); en magenta los terciarios (neógenos y paleógenos); y en verde los preterciarios (mesozoicos, paleozoicos, proterozoicos y arcaicos) (modificado y reelaborado de Servicio Geológico Minero Argentino 2018); b) Ubicación de yacimientos de rocas evaporíticas (modificado y reelaborado de Servicio Geológico Minero Argentino 2018); c) Zonificación de la magnitud de procesos de remoción en masa, resaltando en morado los departamentos con registro de procesos de elevada magnitud, en lila los de moderada magnitud, y en color más claro aquellos sin registro de eventos significativos (modificado y reelaborado de Sistema Nacional de Gestión Integral del Riesgo 2018); d) Mapa de zonificación sísmica (modificado de Instituto Nacional de Prevención Sísmica 2013), resaltando en rojo la zona sísmica 4, en naranja la zona sísmica 3, y en amarillo las zonas sísmicas 2, 1 y 0, propuestas por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica; e) Mapa de estructuras geológicas activas indiferenciadas (modificado de Casa et al. 2014); f) Ubicación de presas ejecutadas (azul liso) y proyectadas (azul con círculo blanco), recopiladas a partir de los inventarios de Emprendimientos Energéticos Binacionales S.A. (2017), Organismo Regulador de Seguridad de Presas (2018) y del Ministerio de Energía y Minería (2018).

El cuarto parámetro considera a la acción sísmica como un factor determinante en la estabilidad de un proyecto hídrico de magnitud. Bajo esta premisa, se incorporó la zonificación sísmica elaborada por el Instituto Nacional de Prevención Sísmica -INPRES- (2013), como una nueva capa del sistema de información geográfica. Se delimitó una zona de susceptibilidad sísmica (SS) elevada, para la zona sísmica 4 del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (en color rojo), con un índice de susceptibilidad sísmica de 2; una zona de susceptibilidad sísmica media, con un índice de 1, para la zona sísmica 3 (en color naranja); y una zona de baja susceptibilidad (en amarillo pálido), con un índice de 0, correspondiente a las zonas 2, 1 y 0 del Instituto Nacional de Prevención Sísmica (Fig. 1d).

Finalmente, se consideró de importancia la presencia de estructuras geológicas activas en la zona de implantación del cierre de las presas, cuya deformación pudiese afectar de manera directa a las obras principales. Para la evaluación de este factor, se adoptó el mapa de deformaciones activas de Casa et al. (2014), representado en la figura 1e. Aquellos proyectos emplazados sobre una estructura geológica activa de cualquier tipo, fueron clasificados con un índice de susceptibilidad neotectónica de 2; frente a los que se encuentran fuera de estas estructuras, con un índice de susceptibilidad neotectónica (SN) nulo.

Paralelamente, se llevó a cabo un relevamiento de las presas construidas y los proyectos estudiados en todo el país, con su respectiva ubicación, tomándose como referencia los inventarios de Emprendimientos Energéticos Binacionales S.A. (2017), del Organismo Regulador de Seguridad de Presas -ORSEP- (2018) y del Ministerio de Energía y Minería -MINEM- (2018). En la figura 1f, se presentan en color azul liso, las presas construidas, y en azul con un círculo blanco, las proyectadas. Este inventario no incluye las presas arroceras ni las de relave minero.

En función de su sitio de emplazamiento, cada presa fue clasificada a partir de un índice de susceptibilidad del terreno (ST), elaborado específicamente para esta etapa de inventario. Este índice es calculado a partir de la suma de los cinco parámetros detallados precedentemente, que corresponden a índices de susceptibilidad geológico – geotécnica, a la disolución, a la remoción en masa, sísmica y neotectónica. Siguiendo este procedimiento, el índice de susceptibilidad del terreno es calculado mediante la expresión: $ST = SG + SD + SR + SS + SN$.

De esta manera, se obtuvieron valores de susceptibilidad del terreno entre 0 y 10, clasificados como de susceptibilidad baja (0-2), media (3-4), alta (5-6) y muy alta (7-10) (Figs. 2 y 3).

Para asignar cada índice de susceptibilidad a cada una

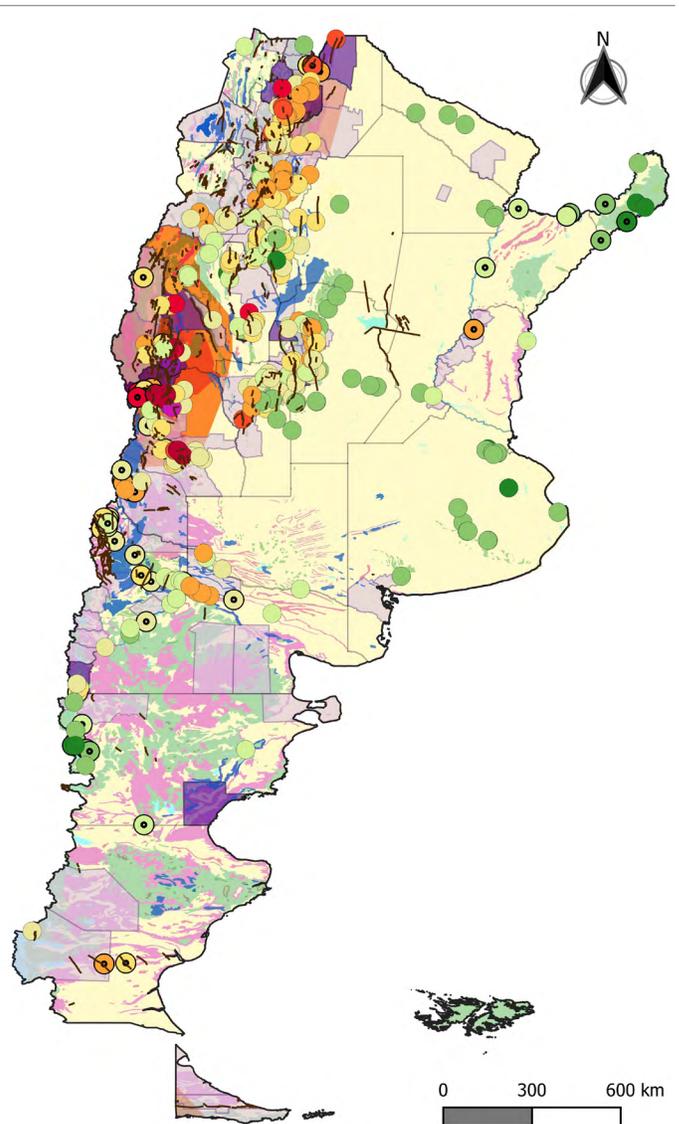


Figura 2: Mapa de susceptibilidad del terreno de fundación de las presas proyectadas (con círculo interno) y ejecutadas (color liso), a escala de inventario, a partir de la zonificación geológico - geotécnica y sismoestructural del territorio argentino. Clasificación elaborada a partir de la superposición de mapas temáticos de la figura 1, mediante el uso software libre QGIS 3.12. Los puntos correspondientes a la ubicación de las presas fueron ampliados para su mejor visualización. Las presas en color verde presentan una baja susceptibilidad del terreno (entre 0 y 2); las de color amarillo representan un valor medio (entre 3 y 4); los aprovechamientos con un índice elevado (entre 5 y 6) se muestran en naranja; y los proyectos de muy elevada susceptibilidad del terreno (entre 7 y 10), son representados en rojo y morado.

de las presas, se consideraron las escalas originales de los mapas temáticos. Así, los mapas geológicos de las figuras 1a y 1b, derivan de los publicados por el Sistema de Información Geográfica Ambiental Minera (2018), a una escala de 1:2500000.

Los mapas de peligrosidad sísmica y registro de procesos de remoción en masa, de las figuras 1c y 1d, basados respectivamente en los mapas del Instituto Nacional de

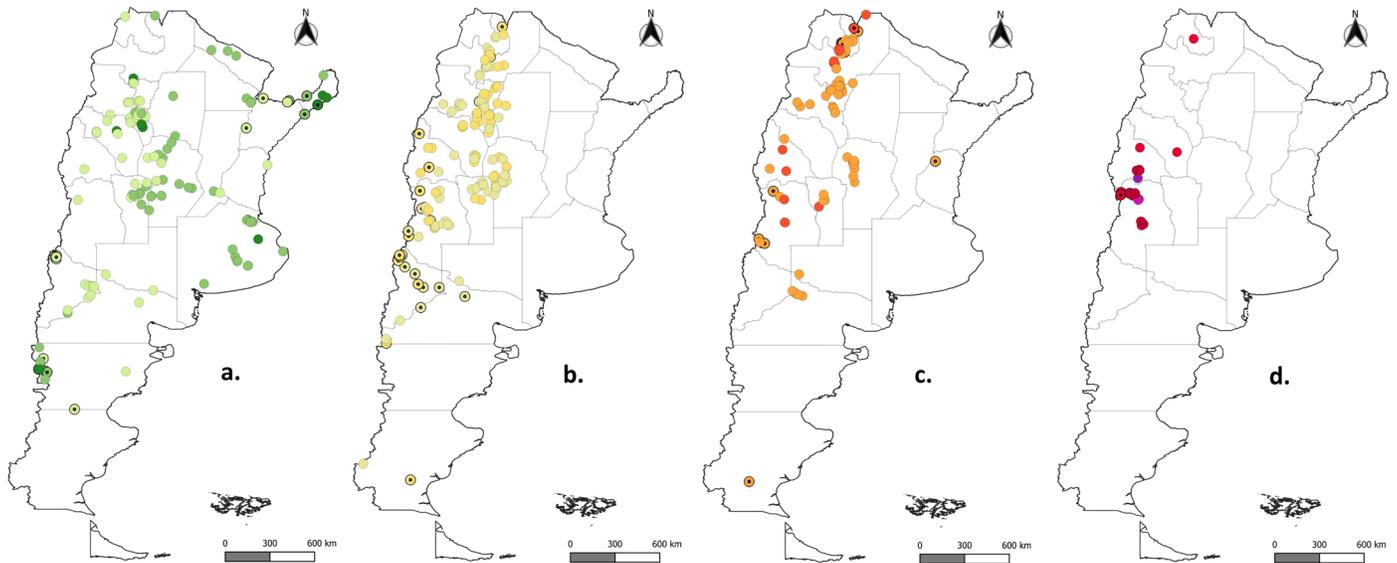


Figura 3: Clasificación de presas ejecutadas (color liso) y proyectadas (con punto negro interior) en el territorio argentino, en función del índice de susceptibilidad de su terreno de fundación. a) Presas de susceptibilidad del terreno baja (entre 0 y 2); b) Presas de susceptibilidad del terreno media (entre 3 y 4); c) Presas de susceptibilidad del terreno alta (entre 5 y 6); d) Presas de susceptibilidad del terreno muy alta (entre 7 y 10).

Prevención Sísmica (2013) y del Sistema Nacional de Gestión Integral del Riesgo (2018), carecen de una escala explícita. Sin embargo, al haber sido elaborados siguiendo límites políticos departamentales y no físicos, la escala no reviste mayor importancia, ya que podrían considerarse como mapas *raster*, con píxeles de un tamaño variable, en función del tamaño del departamento, que a su vez se relaciona con la densidad demográfica y, en algunos casos, la abundancia de registros. A los fines de efectuar los cálculos, se le asigna al mapa del Instituto Nacional de Prevención Sísmica una escala un tanto arbitraria de 1:5000000. Para el mapa del Sistema Nacional de Gestión Integral del Riesgo, sin embargo, se considera que la localización de un evento de remoción posee un grado de incertidumbre muy inferior al de un sismo, por lo que se le asignó una escala conservadora de 1:100000.

El mapa de estructuras activas de la figura 1e, se basa en el de Casa et al. (2014), cuya escala es variable entre 1:250000 y 1:750000, adoptándose esta última para los cálculos en esta etapa.

La ubicación de las presas proyectadas y construidas (Fig. 1f), proviene de diferentes fuentes sin escalas, si bien todas parecen tener un grado de detalle elevado. No se considera, en esta etapa, la magnitud de las áreas de embalse, que excede con creces a la de los cierres.

En función del grosor de los puntos y polígonos del sistema de información geográfica, se adopta una tolerancia de 5 mm hacia cada lado en los diferentes datos. Esto significa que cada aprovechamiento podría ubicarse en un radio: $r = 5 \text{ mm} / \text{escala}$. Por este motivo, y siguiendo un criterio conser-

vador para esta etapa de inventario, a cada presa se le asignó el índice correspondiente a la zona más susceptible ubicada en ese radio de tolerancia. Por ejemplo, para la susceptibilidad geológico-geotécnica y la susceptibilidad a la disolución, se tomó el mayor valor en un radio de 1.25 km (0.000005 km x 250000); para la susceptibilidad sísmica, de 25 km; para la susceptibilidad a la remoción en masa, de 1 km; y para la susceptibilidad neotectónica de 4 km.

RESULTADOS

Una vez establecida la configuración geológico - geotécnica, aluvional y sismoestructural del territorio nacional a escala de inventario, y establecida la ubicación de las presas inventariadas, se procedió a clasificar cada uno de estos aprovechamientos en función de su susceptibilidad a presentar complejidades en su terreno de fundación y área de embalse. Como fuera desarrollado en el capítulo precedente, para llevar a cabo esta clasificación, se elaboró un índice de susceptibilidad del terreno, generado a partir de la suma de sus susceptibilidades parciales (susceptibilidad geológico-geotécnica, susceptibilidad a la disolución, susceptibilidad a la remoción en masa, susceptibilidad sísmica y susceptibilidad neotectónica). En esta etapa, la caracterización de los embalses ha sido incluida dentro del análisis de las zonas de cierre, por cuestiones de escala.

De esta manera, el índice susceptibilidad del terreno adopta valores comprendidos entre 0 y 10, definiendo rangos

de susceptibilidad baja (susceptibilidad del terreno entre 0 y 2), media (susceptibilidad del terreno entre 3 y 4), alta (susceptibilidad del terreno entre 5 y 6) y muy alta (susceptibilidad del terreno entre 7 y 10).

La figura 2 reproduce la superposición de los mapas temáticos elaborados y presentados en la figura 1, estableciendo el grado de susceptibilidad de cada una de las presas proyectadas (con círculo interno) y ejecutadas (color liso), identificándolas con un color verde (baja), amarillo (media), naranja (alta) o rojo y morado (muy alta).

En la figura 3 se representan, para su mejor visualización, un detalle de los aprovechamientos clasificados como de baja (Fig. 3a), media (Fig. 3b), alta (Fig. 3c) y muy alta susceptibilidad (Fig. 3d).

A partir de los resultados obtenidos, se elaboró una base de datos agrupando las presas proyectadas (Cuadro 1) y ejecutadas (Cuadro 2), en función de su susceptibilidad a presentar inconvenientes en su terreno de fundación. En este último cuadro, se menciona si cada obra se encuentra o no bajo la jurisdicción del Organismo Regulador de Seguridad de Presas.

De un total de 57 proyectos de presas inventariados, el 32 % presenta una susceptibilidad baja; el 42 % media, el 21 % alta y el 5 % muy alta. De los 340 aprovechamientos ejecutados que han sido inventariados, el 36 % ha presentado un índice de susceptibilidad del terreno bajo, el 34 % medio, el 23 % alto, y el 7 % muy alto.

Para aquellas presas clasificadas con un índice de susceptibilidad del terreno bajo (18 proyectadas y 123 construidas), se prevé, en esta primera etapa de comparación de alternativas, un comportamiento de sus terrenos de fundación y áreas de embalse con un bajo grado de complejidades, si bien pueden presentar dificultades puntuales, como la presencia de materiales solubles, fallas activas u otras situaciones no previstas, que requieran mayores estudios y/o tratamientos.

Las presas clasificadas con una susceptibilidad media (24 proyectadas y 116 construidas), presentan al menos dos características de su terreno de emplazamiento, que ameritan una mayor profundización en estudios básicos, tanto de anteproyecto, como de auscultación, a fin de determinar las posibles consecuencias en su comportamiento. Un ejemplo conocido por los autores es el de la presa El Cajón (susceptibilidad del terreno = 4), en la provincia de Tucumán, donde la presencia de grandes cantidades de yeso, ha impedido hasta el momento el llenado del embalse (Celli 2018).

Por su parte, los aprovechamientos con un índice de susceptibilidad del terreno elevado (11 proyectados y 77 construidos) y muy elevado (3 proyectados y 24 construidos), tienen

mayores probabilidades de presentar serias complicaciones en sus terrenos de fundación y zonas de embalse, que obligan a considerar mayores inversiones en estudios y tratamientos, así como una profusa red de auscultación y tareas de mantenimiento. Dentro de estos 14 proyectos en cartera, se destaca la presa Condor Cliff (ex Néstor Kirchner), en actual ejecución, la cual presenta importantes retrasos de obra, debido a la presencia de un entorno geológico altamente complejo e inestable, caracterizado por un macizo de rocas terciarias débiles (Celli 2014a, b).

Analizando la figura 3, puede apreciarse una tendencia al agrupamiento de presas con mayores susceptibilidades en las siguientes regiones del territorio nacional:

El Noroeste Argentino, caracterizado por macizos de rocas sedimentarias terciarias débiles de las Sierras Subandinas, con una peligrosidad sísmica elevada y un régimen de precipitaciones torrenciales, lo que genera un ambiente propicio para la proliferación de eventos de remoción en masa y una mayor susceptibilidad al atarquinamiento, si bien este último aspecto ha sido evaluado solo indirectamente.

Cuyo, la región de mayor actividad sísmica del país, con un relieve escarpado y zonas con ambientes kársticos. Este último aspecto es quizás el que presenta el mayor grado de incertidumbre.

La Patagonia Austral Extraandina, con macizos rocosos de baja a muy baja calidad geotécnica, y valles con laderas inestables. Si bien esta región se caracteriza por la escasa cantidad relativa de obras y proyectos de presas, puede ser incluida como una zona francamente compleja.

En menor medida, las Sierras Pampeanas y la región del Comahue presentan sectores de elevada susceptibilidad, así como las barrancas del río Paraná en Entre Ríos, donde se combinan ambientes kársticos con laderas inestables.

Estos resultados constituyen una base de conocimiento general, que contribuye al análisis comparativo de proyectos en etapa pre-licitatoria, a la vez que se presenta como una herramienta útil para una primera evaluación de las necesidades presupuestarias de mantenimiento de presas ejecutadas. Bajo ningún aspecto pretenden reemplazar cualquier tipo de investigación sobre el terreno, ni menos aún dar por concluidas etapas de anteproyecto.

Para citar otro ejemplo que revela la importancia de la profundización de los estudios básicos secuenciales, se puede mencionar el caso de Casa de Piedra, que con la información analizada en el presente trabajo, es clasificada como de susceptibilidad del terreno = 2), no ha sido detectada la

Cuadro 1. Clasificación de presas proyectadas en función de la susceptibilidad de su terreno de fundación. Abreviaturas: GEO: susceptibilidad geológico-geotécnica; DIS: susceptibilidad de la disolución; NEO: susceptibilidad neotectónica; REM: susceptibilidad a la remoción en masa; SÍS: susceptibilidad sísmica.

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	RÍO	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
Los Gateados II	Mendoza	Mendoza	2	2	2	2	0	8
Río Blanco II - Punta de Vacas	Mendoza	Mendoza	2	2	2	2	0	8
Tupungato Superior	Mendoza	Tupungato	2	2	1	2	0	7
El Pescado 1	Salta	Pescado	2	0	1	1	2	6
Arroyo Feliciano	Entre Ríos	Arroyo Feliciano	2	2	1	0	0	5
Condor Cliff	Santa Cruz	Santa Cruz	2	0	1	0	2	5
El Seguro - Los Mallines	Mendoza	Grande	2	2	1	0	0	5
Peñas Coloradas	Salta	Bermejo	2	0	2	1	0	5
Portezuelo del Viento	Mendoza	Grande	2	2	1	0	0	5
Bardas Blancas	Mendoza	Grande	2	2	1	0	0	5
Río Burreumayo - Cierre 1	Jujuy	Burreumayo	2	0	2	1	0	5
Río Burreumayo - Cierre 2	Jujuy	Río Burreumayo	2	0	2	1	0	5
Río Burreumayo - Cierre 3	Jujuy	Río Burreumayo	2	0	2	1	0	5
Río Grande Inferior	Jujuy	Grande	2	0	2	1	0	5
Uspallata - Los Gateados II	Mendoza	Mendoza	1	0	2	2	0	5
Arroyo Lindo	Río Negro	Arroyo Lindo	2	0	2	0	0	4
Chihuido I	Neuquén	Neuquén	1	2	1	0	0	4
Covunco	Neuquén	Varvarco	2	2	0	0	0	4
El Baqueano	Mendoza	Diamante	2	0	1	1	0	4
El Tambolar	San Juan	San Juan	2	0	0	2	0	4
La Barrancosa	Santa Cruz	Santa Cruz	2	0	0	0	2	4
La Palca	San Juan	La Palca	2	0	1	1	0	4
Los Guiones	Neuquén	Nahuere	2	0	0	0	2	4
Manzano Amargo	Neuquén	Neuquén	2	0	0	0	2	4
Mojotoro	Salta	Mojotoro	2	0	1	1	0	4
Río Blanco II - Uspallata	Mendoza	Blanco	1	0	1	2	0	4
Ríos Iruya - El Portillo	Salta	Iruya	2	0	1	1	0	4
Risco Negro - El Montañes	Mendoza	Grande	1	2	1	0	0	4
Roblecillos	Neuquén	Neuquén	2	0	0	0	2	4
Cerro Rayoso	Neuquén	Neuquén	1	2	0	0	0	3
Chihuido II	Neuquén	Neuquén	1	2	0	0	0	3
El Chañar	Neuquén	Neuquén	2	0	1	0	0	3
La Estrechura - Valle Noble	Mendoza	Grande	0	2	1	0	0	3
La Invernada	Neuquén	Neuquén	1	2	0	0	0	3
Los Blancos I	Mendoza	Tunuyán	1	0	1	1	0	3
Los Blancos II	Mendoza	Tunuyán	1	0	1	1	0	3
Michihuao	Río Negro - Neuquén	Lima	2	0	1	0	0	3
Potrero del Clavillo	Tucumán - Catamarca	Las Cañas	2	0	1	0	0	3
Río Negro Superior	Río Negro	Río Negro	2	0	1	0	0	3
Atreuco	Neuquén	Varvarco	2	0	0	0	0	2
Colo Michi Co	Neuquén	Neuquén	2	0	0	0	0	2
Cura Mileo	Neuquén	Neuquén	2	0	0	0	0	2
Itatí - Itacorá	Corrientes	Paraná	2	0	0	0	0	2
Los Monos	Chubut	Senguer	2	0	0	0	0	2
Matancilla	Neuquén	Varvarco	2	0	0	0	0	2
Percy - La Escondida	Chubut	Percy	2	0	0	0	0	2

Cuadro 1. (Cont.) Clasificación de presas proyectadas en función de la susceptibilidad de su terreno de fundación. Abreviaturas: GEO: susceptibilidad geológico-geotécnica; DIS: susceptibilidad de la disolución; NEO: susceptibilidad neotectónica; REM: susceptibilidad a la remoción en masa; SÍS: susceptibilidad sísmica.

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	RÍO	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
Rio de Llanura	Corrientes - Santa Fe	Paraná	2	0	0	0	0	2
Yacretá (ampliación)	Corrientes	Paraná	2	0	0	0	0	2
Aña Cua	Corrientes	Paraná	1	0	0	0	0	1
Corpus Christi	Misiones	Paraná	1	0	0	0	0	1
Garabí	Corrientes - Misiones	Uruguay	1	0	0	0	0	1
Jaramillo	Chubut	Carreleunfu	1	0	0	0	0	1
La Caridad	Chubut	Carreleunfu	1	0	0	0	0	1
La Elena	Chubut	Carreleunfu	1	0	0	0	0	1
Rio Hielo	Chubut	Hielo	1	0	0	0	0	1
Frontera II	Chubut	Carreleunfu	0	0	0	0	0	0
Panambí	Corrientes - Misiones	Uruguay	0	0	0	0	0	0

presencia de rocas solubles (susceptibilidad a la disolución = 0), ampliamente reconocida en la zona del cierre (Massabie y Capdevila 1989). Esta situación, sin embargo, no contradice los resultados obtenidos y se encuentra dentro de lo esperable, habida cuenta que la presencia de yeso en la fundación fue registrada recién en la etapa constructiva, no teniéndose indicios en la fase de inventario. La susceptibilidad media con la que fue clasificada, expone la presencia de incertidumbres que deben ser investigadas con mayores estudios y monitoreo.

La lógica secuencial de este trabajo, también puede apreciarse en la susceptibilidad a la remoción en masa, cuyo análisis a nivel departamental se considera válido en esta etapa, debiendo ser ajustado en fases futuras, en función de las características geomorfológicas y geomecánicas de cada una de las cuencas.

CONCLUSIONES

El presente trabajo ha sido estructurado emulando las etapas de desarrollo progresivo de un proyecto de grandes presas de embalse. De esta manera, se ha perseguido un avance sistemático en el grado de conocimiento, yendo desde lo general a lo particular, con objetivos concretos para cada etapa, cuya conclusión valide los posteriores avances, y reduzca progresivamente la principal fuente de incertidumbres en este tipo de proyectos, dada por las características geomecánicas del terreno.

En esta primera etapa de inventario, se ha planteado la revisión de las características generales del terreno de fundación de las presas proyectadas y ejecutadas en el territo-

rio argentino, elaborando una base de datos en función de la susceptibilidad a presentar complejidades en el terreno, con el fin de contribuir en la reducción del riesgo técnico-económico y socioambiental que conlleva un proyecto de estas características.

A cada uno de estos aprovechamientos se le asignó un índice de susceptibilidad del terreno de fundación, elaborado especialmente para esta etapa, sobre la base de una serie de parámetros del terreno, adaptados a partir de antecedentes cartográficos publicados por organismos del Estado Nacional.

Una de las metas planteadas para esta etapa, fue la de identificar, a partir de esta clasificación, regiones del territorio nacional, cuyas características geológicas sensu lato, indican la necesidad de profundizar la inversión en campañas de estudios básicos, particularmente en las etapas de anteproyecto previas a la emisión del pliego licitatorio, en el caso de las obras proyectadas; o bien la necesidad de llevar a cabo auditorías técnicas sistemáticas, en el caso de las obras en funcionamiento. Consecuentemente, se especificó en el Cuadro 2 si las obras se encuentran o no bajo la jurisdicción del Organismo Regulador de Seguridad de Presas, cuya negativa no implica que no se hallen bajo la órbita de organismos provinciales análogos.

A partir de este proceso, fueron identificadas tres regiones de elevada susceptibilidad, con una mayor probabilidad de presentar condiciones del terreno que favorezcan la inestabilidad de los cimientos de grandes obras ingenieriles, particularmente las grandes presas de embalse: Noroeste Argentino, Cuyo y Patagonia Extraandina. A su vez, fueron identificadas otras tres regiones, en las han sido reconocidos sectores puntualmente susceptibles: Sierras Pampeanas, Comahue y Litoral.

Cuadro 2. Clasificación de presas ejecutadas en función de la susceptibilidad de su terreno de fundación. Abreviaturas: GEO: susceptibilidad geológico-geotécnica; DIS: susceptibilidad de la disolución; REM: susceptibilidad a la remoción en masa; SÍS: susceptibilidad sísmica; NEO: susceptibilidad neotectónica; ORSEP: Organismo Regulador de Seguridad de Presas.

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	SUPERVISIÓN ORSEP	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
Las Crucecitas	San Juan	NO	2	2	2	2	2	10
El Carrizal	Mendoza	NO	2	2	1	2	2	9
Álvarez Condarco	Mendoza	NO	2	2	2	2	0	8
Azud Derivador 2	Mendoza	NO	2	2	1	1	2	8
Derivador De Riego	Mendoza	NO	2	2	1	1	2	8
Galileo Vitali	Mendoza	NO	2	2	1	1	2	8
José Ignacio De La Roza	San Juan	NO	2	2	0	2	2	8
Las Compuertas	Mendoza	NO	2	2	2	2	0	8
Los Coroneles	Mendoza	NO	2	2	1	1	2	8
Papagayos	Mendoza	NO	2	2	0	2	2	8
Potrerosillos	Mendoza	NO	2	2	2	2	0	8
Punta Negra	San Juan	NO	2	2	0	2	2	8
Quebrada De Ullum	San Juan	NO	2	2	0	2	2	8
San Emiliano	San Juan	NO	2	2	0	2	2	8
Zanjón Frías	Mendoza	NO	2	2	0	2	2	8
Zanjón Maure	Mendoza	NO	2	2	0	2	2	8
Gob. T. Benegas	Mendoza	NO	2	2	1	2	0	7
Huasamayo (Garganta Del Diablo)	Jujuy	NO	2	0	2	1	2	7
La Aguadita	La Rioja	NO	2	2	1	0	2	7
Los Cauquenes	San Juan	NO	2	2	2	1	0	7
Lujan de Cuyo	Mendoza	NO	2	2	1	2	0	7
San Martín	Mendoza	NO	2	2	1	2	0	7
Soldano	San Juan	NO	1	2	0	2	2	7
Valle Grande (Nihuil IV)	Mendoza	SI	1	2	1	1	2	7
Azud Sin Nombre 11	Mendoza	NO	2	2	0	2	0	6
El Tala	Salta - Tucumán	NO	2	3	1	0	0	6
Itiyuro I	Salta	NO	2	0	2	0	2	6
Itiyuro II	Salta	NO	2	0	2	0	2	6
Juan Galán I	Jujuy	NO	2	0	1	1	2	6
Juan Galán II	Jujuy	NO	2	0	1	1	2	6
Los Alisos	Jujuy	NO	2	0	1	1	2	6
Los Laureles	Salta	NO	2	0	1	1	2	6
Los Molinos	Jujuy	NO	2	0	1	1	2	6
Nazario Benavidez	San Juan	NO	2	2	0	2	0	6
Presa Sobre A° Bebedero	San Luis	NO	1	2	1	0	2	6
Quebrada Del Toro	Salta	NO	2	0	1	1	2	6
Rio Corralito	Salta	NO	2	0	1	1	2	6
Rio Toro	Salta	NO	2	0	1	1	2	6
Salto de La Loma	San Juan	NO	1	0	2	1	2	6
El Tigre	Mendoza	SI	2	2	1	1	0	6
Los Reyunos	Mendoza	SI	2	2	1	1	0	6
Agua Colorada	Catamarca	NO	2	0	1	0	2	5
Allen	Rio Negro	NO	2	2	1	0	0	5
Ampascachi III	Salta	NO	2	0	0	1	2	5
Azud Sin Nombre 04	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	SUPERVISIÓN ORSEP	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
Azud Sin Nombre 06	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Azud Sin Nombre 07	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Azud Sin Nombre 09	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Azud Sin Nombre 10	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Benjamín Paz	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Catamontaña	Jujuy	NO	2	0	0	1	2	5
Central Barrealito	San Juan	NO	2	0	1	2	0	5
Chico	San Luis	NO	2	0	1	0	2	5
Cipolletti	Mendoza	NO	2	0	1	2	0	5
Condor Huasi	Catamarca	NO	2	0	1	0	2	5
Cruz de Piedra	San Luis	NO	2	0	1	0	2	5
Gral. Roca	Rio Negro	NO	2	2	1	0	0	5
Guanchin	Catamarca	NO	2	0	1	0	2	5
Horco Huasi	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Huacra 1	Tucumán - Catamarca	NO	2	0	1	0	2	5
Huacra 2	Tucumán - Catamarca	NO	2	0	1	0	2	5
Huerta Mala	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Ing. Ballester	Neuquén - Rio Negro	NO	2	2	1	0	0	5
Ing. Cesar Cipolletti	Rio Negro	NO	2	2	1	0	0	5
Julián Romero	Rio Negro	NO	2	2	1	0	0	5
La Aguadita	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
La Ciénaga	Jujuy	NO	2	0	0	1	2	5
La Falda	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
La Higuera	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Las Colas	Salta - Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Las Loicas	Mendoza	NO	2	2	1	0	0	5
Las Maderas	Jujuy	NO	2	0	0	1	2	5
Las Pircas	Jujuy	NO	2	0	0	1	2	5
Los Alazanes	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Los Cardones N° 1	Tucumán	NO	2	0	1	0	2	5
Los Cardones N° 2	Tucumán	NO	2	0	1	0	2	5
Los Chorrillos	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Los Molinos N° 1	Córdoba	NO	1	0	2	0	2	5
Los Nacimientos	La Rioja	NO	2	0	0	1	2	5
Los Zazos	Tucumán	NO	2	0	1	0	2	5
Lules	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Nogolí	San Luis	NO	2	0	1	0	2	5
Piedras Moras	Salta - Jujuy	NO	2	0	2	1	0	5
Pinchas 1	La Rioja	NO	1	0	2	0	2	5
Popayán	Jujuy	NO	2	0	0	1	2	5
Portecelo	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Puesto Del Rosario	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Punto Unido	Rio Negro	NO	2	2	1	0	0	5
Rio San Francisco	Jujuy	NO	2	0	2	1	0	5
Rio Tercero N° 1	Córdoba	NO	1	0	2	0	2	5
San Francisco	Jujuy	NO	2	0	0	1	2	5
San Ignacio	Tucumán	NO	2	0	1	0	2	5
San Jerónimo	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
San Lorenzo	Jujuy	NO	2	0	2	1	0	5

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	SUPERVISIÓN ORSEP	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
San Roque	Córdoba	NO	2	0	1	0	2	5
Santa María	Catamarca	NO	2	0	1	0	2	5
Saucedo	Jujuy	NO	2	0	2	1	0	5
Tacanas	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Viejo Lules	Tucumán	NO	2	2	1	0	0	5
Batirua	Tucumán	SI	2	0	1	0	2	5
Dr. Celestino Gelsi (El Cadillal)	Tucumán	SI	2	2	1	0	0	5
Achalco	Catamarca	NO	2	2	0	0	0	4
Aguanda	Mendoza	NO	2	0	1	1	0	4
Albigasta	Catamarca	NO	2	2	0	0	0	4
Anillaco	La Rioja	NO	1	0	1	0	2	4
Azud Nivelador Chico	Córdoba	NO	1	0	1	0	2	4
Campo Alegre	Salta	NO	2	0	1	1	0	4
Campo Alegre (Azud derivador)	Salta	NO	2	0	1	1	0	4
Caspichango	Tucumán	NO	2	2	0	0	0	4
Chuquis	La Rioja	NO	1	0	1	0	2	4
Cisco	La Rioja	NO	2	2	0	0	0	4
Colana	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
Colorado	Salta	NO	2	0	1	1	0	4
Cuesta del Viento	San Juan	NO	2	0	1	1	0	4
El Cajón	Tucumán	NO	2	2	0	0	0	4
El Garabato	La Rioja	NO	2	2	0	0	0	4
El Saladillo	La Rioja	NO	2	2	0	0	0	4
El Tajamar	Tucumán	NO	2	2	0	0	0	4
El Viborón	Mendoza	NO	1	0	1	2	0	4
Joyango	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
La Angostura	Tucumán	NO	1	0	1	0	2	4
La Calera	Tucumán	NO	1	0	1	0	2	4
La Calera	Córdoba	NO	2	2	0	0	0	4
La Viña - Ing. Medina Allende	Córdoba	NO	1	0	1	0	2	4
La Viña (Comp.)	Córdoba	NO	1	0	1	0	2	4
Las Lomitas	Salta	NO	2	0	1	1	0	4
Las Tunas	Mendoza	NO	2	2	0	0	0	4
Loma Atravesada	Rio Negro	NO	2	0	2	0	0	4
Los Bazanes	Catamarca	NO	2	2	0	0	0	4
Mal Paso	Córdoba	NO	1	0	1	0	2	4
Miraflores	Catamarca	NO	2	0	1	1	0	4
Miraflores	Salta	NO	1	0	1	0	2	4
Mutquin	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
Pachimoco	San Juan	NO	1	0	2	1	0	4
Paso de las Carretas	San Luis	NO	2	0	0	0	2	4
Piedra Blanca	San Luis	NO	1	0	1	0	2	4
Pinchas 2	La Rioja	NO	1	0	1	0	2	4
Potrero De Funes	San Luis	NO	1	0	1	0	2	4
Rincón	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
Rumi Punco	Tucumán	NO	1	0	1	0	2	4
San Gerónimo	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
San Guillermo	San Juan	NO	1	0	1	2	0	4

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	SUPERVISIÓN ORSEP	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
San Miguel	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
Saujil	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
Sijan	Catamarca	NO	1	0	1	0	2	4
Agua del Toro	Mendoza	SI	2	0	1	1	0	4
Aisol (Nihuil II)	Mendoza	SI	2	0	1	1	0	4
El Nihuil	Mendoza	SI	2	0	1	1	0	4
Escaba	Tucumán	SI	2	0	0	0	2	4
Gral. Martín de Güemes (El Tunal)	Salta	SI	2	0	1	1	0	4
Los Quiroga	Santiago del Estero	SI	2	2	0	0	0	4
Río Hondo	Santiago del Estero	SI	2	2	0	0	0	4
Abaucan I	Catamarca	NO	2	0	1	0	0	3
Alto Quines (El Muro)	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Ampascachi	Salta	NO	2	0	0	1	0	3
Ampascachi I	Salta	NO	2	0	0	1	0	3
Ampascachi II	Salta	NO	2	0	0	1	0	3
Arroyo Corto	Córdoba	NO	1	0	2	0	0	3
Azud Derivador 1	Mendoza	NO	1	0	1	1	0	3
Azud Nivelador Papagayos	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Azud Sin Nombre 08	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Belén	Catamarca	NO	2	0	1	0	0	3
Blas Brisoli	Mendoza	NO	2	0	1	0	0	3
Boca Del Río	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Casa de Piedra	La Pampa - Río Negro	NO	2	0	1	0	0	3
Cortaderas	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Cortaderas	Catamarca	NO	2	0	1	0	0	3
Derivador Real Padre	Mendoza	NO	1	0	1	1	0	3
El Anzulón	La Rioja	NO	1	2	0	0	0	3
El Cajón	Córdoba	NO	2	0	1	0	0	3
El Molino	Tucumán	NO	2	0	1	0	0	3
El Shincal	Catamarca	NO	2	0	1	0	0	3
El Tipal	Jujuy	NO	2	0	0	1	0	3
Gustavo André	Mendoza	NO	1	0	0	2	0	3
L.N. Alem	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
La Cruz	Córdoba	NO	1	0	2	0	0	3
La Dársena	Salta	NO	2	0	1	0	0	3
La Huertita	San Luis	NO	0	0	1	0	2	3
La Quintana II	Córdoba	NO	1	0	2	0	0	3
Lago Escondido	Río Negro	NO	1	0	2	0	0	3
Laguna Azul	Santa Cruz	NO	2	0	1	0	0	3
Las Barrancas	Catamarca	NO	2	0	1	0	0	3
Las Juntas	Catamarca	NO	2	0	1	0	0	3
Las Palmeras	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Los Molinos I	Catamarca	NO	1	2	0	0	0	3
Los Molinos II	Catamarca	NO	1	2	0	0	0	3
Los Molinos N° 2 (La Quintana I)	Córdoba	NO	1	0	2	0	0	3
Los Pizarros	Tucumán	NO	2	0	1	0	0	3
Los Sauces (San Carlos)	Salta	NO	2	0	1	0	0	3
Los Tapones	San Juan	NO	1	0	0	2	0	3
Marapa	Tucumán	NO	2	0	1	0	0	3

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	SUPERVISIÓN ORSEP	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
Motegasta	Catamarca	NO	1	2	0	0	0	3
Olta	La Rioja	NO	1	0	0	0	2	3
Pampichuela	Jujuy	NO	2	0	0	1	0	3
Phillips	Mendoza	NO	1	0	0	2	0	3
Pichanas	Córdoba	NO	1	0	2	0	0	3
Piscu Yaco	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Puerta de Diaz (Cnel. Moldes)	Salta	NO	2	0	0	1	0	3
Rincón del Indio	Mendoza	NO	1	0	1	1	0	3
Río Reyes	Jujuy	NO	1	0	1	1	0	3
Río Tercero N° 2	Córdoba	NO	1	0	2	0	0	3
Río Tercero N° 3	Córdoba	NO	1	0	2	0	0	3
San Felipe	San Luis	NO	1	0	0	0	2	3
Valle De Uco	Mendoza	NO	1	0	1	1	0	3
Valle Fértil	San Juan	NO	1	0	1	1	0	3
Valle Grande	Jujuy	NO	2	0	0	1	0	3
Vidalino	Mendoza	NO	1	0	1	1	0	3
Villa Gral. Roca	San Luis	NO	2	0	1	0	0	3
Villa La Punta	Santiago del Estero	NO	1	2	0	0	0	3
Villa Lola	Tucumán	NO	2	0	1	0	0	3
Yaucha	Mendoza	NO	1	0	1	1	0	3
Alicura	Neuquén - Río Negro	SI	2	0	1	0	0	3
Gral. Belgrano (Cabra Corral)	Salta	SI	2	0	0	1	0	3
Peñas Blancas	Mendoza	SI	2	0	0	1	0	3
Pueblo Viejo - Deriv. La Horqueta	Tucumán	SI	2	0	1	0	0	3
Pueblo Viejo - Deriv. Los Reales	Tucumán	SI	2	0	1	0	0	3
Tierras Blancas (Nihuil III)	Mendoza	SI	1	0	1	1	0	3
Abaucan II	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Andalgala	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Arroyo Ludueña	Santa Fe	NO	1	0	1	0	0	2
Cerro Pelado I	Córdoba	NO	0	0	2	0	0	2
Cerro Pelado II (Cierre Lateral)	Córdoba	NO	0	0	2	0	0	2
Chañarmuyo	La Rioja	NO	2	0	0	0	0	2
Choya	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Coyagasta	Catamarca	NO	0	2	0	0	0	2
Cruz del Eje	Córdoba	NO	1	0	1	0	0	2
Cusí Cusí	Jujuy	NO	2	0	0	0	0	2
El Arbolar	Tucumán	NO	1	0	1	0	0	2
El Jumeal	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
El Pichao	Tucumán	NO	1	0	1	0	0	2
El Portezuelo	La Rioja	NO	1	0	0	1	0	2
El Potrero	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
El Rincón	Tucumán	NO	2	0	0	0	0	2
El Saltón	Tucumán	NO	2	0	0	0	0	2
El Simbolar	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Ingeniero Guillermo Céspedes	Río Negro	NO	2	0	0	0	0	2
Intaco	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
La Estrechura	San Luis	NO	1	0	1	0	0	2
La Quebrada	Córdoba	NO	1	0	1	0	0	2
Las Peñas	La Rioja	NO	1	0	0	1	0	2

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	SUPERVISIÓN ORSEP	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
Las Pirquitas	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Las Tunas	Catamarca	NO	1	0	0	1	0	2
Loma Colorada	Tucumán	NO	1	0	1	0	0	2
Los Caracoles	San Juan	NO	0	0	0	2	0	2
Los Colorados	La Rioja	NO	1	0	0	1	0	2
Los Divisaderos	La Pampa	NO	2	0	0	0	0	2
Los Sauces	La Rioja	NO	1	0	1	0	0	2
Lujan	San Luis	NO	1	0	1	0	0	2
Paso de Las Campanas	Córdoba	NO	1	0	1	0	0	2
Payahuaico	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Poman	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Saladillo	San Luis	NO	2	0	0	0	0	2
Salto Andersen	La Pampa - Rio Negro	NO	2	0	0	0	0	2
Salto Grande	Entre Ríos	NO	2	0	0	0	0	2
San Pedro	San Luis	NO	1	0	1	0	0	2
Santa Isabel	Tucumán	NO	1	0	1	0	0	2
Santa Rosa	San Luis	NO	1	0	1	0	0	2
Sauce Mayo	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Sumampa	Catamarca	NO	1	0	1	0	0	2
Viejo Managua	Tucumán	NO	1	0	1	0	0	2
Villa Unión	La Rioja	NO	1	0	0	1	0	2
Yacyreta	Corrientes	NO	2	0	0	0	0	2
Arroyito	Neuquén - Rio Negro	SI	1	0	1	0	0	2
El Chañar	Neuquén	SI	1	0	1	0	0	2
El Chocón	Neuquén - Rio Negro	SI	1	0	1	0	0	2
Florentino Ameghino	Chubut	SI	0	2	0	0	0	2
Loma de La Lata	Neuquén	SI	1	0	1	0	0	2
Mari Menuco	Neuquén	SI	1	0	1	0	0	2
Pichi Picun Leufu	Neuquén - Rio Negro	SI	2	0	0	0	0	2
Planicie Banderita	Neuquén	SI	1	0	1	0	0	2
Portezuelo Grande	Neuquén	SI	1	0	1	0	0	2
Achiras	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Antonio Esteban Agüero	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
Arroyo Azul	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Azud Nivelador I	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Azud Nivelador II	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Azud Sin Nombre 01	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Azud Sin Nombre 02	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Azud Sin Nombre 03	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Azud Sin Nombre 05	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Azud Sin Nombre 12	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
Azud sobre canal de riego	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Báez	Santiago del Estero	NO	1	0	0	0	0	1
Bañado La Estrella	Formosa	NO	1	0	0	0	0	1
Boca de la Sierra	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Cascallares	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Concaran	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
Copacabana	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Del Lago	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Del Lujan	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1

APROVECHAMIENTO	PROVINCIA	SUPERVISIÓN ORSEP	SUSCEPTIBILIDAD					ÍNDICE DE SUSCEPTIBILIDAD DEL TERRENO
			GEO	DIS	REM	SÍS	NEO	
Del Rio Salado	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
El Cajón	Chubut	NO	1	0	0	0	0	1
El Chañar (Mercedes)	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
El Durazno	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
El Trapiche I	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
El Trapiche II	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
El Trapiche III	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
El Trapiche IV	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
El Trapiche V	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
El Turbio	Chubut	NO	0	0	1	0	0	1
Figuroa	Santiago del Estero	NO	1	0	0	0	0	1
Ing. P.P. Marín	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Ing. Roggero	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Jauregui	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
La Cañada	Catamarca	NO	1	0	0	0	0	1
La Cruz	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
La Florida	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
La Salada	Formosa	NO	1	0	0	0	0	1
La Toma	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
Laguna Blanca	Chaco	NO	1	0	0	0	0	1
Laguna Yema	Formosa	NO	1	0	0	0	0	1
Languay	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Las Lajas	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Las Salvias	Catamarca	NO	0	0	1	0	0	1
Los Toldos	Salta	NO	0	0	1	0	0	1
Paso de Las Piedras	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Piedras Moras	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Pisco Huasi	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Poetisa Vidal (Estancia Grande)	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
Ramal H	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Rio Negro - Control Barranqueras	Chaco	NO	1	0	0	0	0	1
Rio Negro - Control Soberania	Chaco	NO	1	0	0	0	0	1
San Pedro	Catamarca	NO	1	0	0	0	0	1
Tajamares	Santa Fe	NO	1	0	0	0	0	1
Tapalqué	Buenos Aires	NO	1	0	0	0	0	1
Uruguay	Misiones	NO	1	0	0	0	0	1
Villa María de Rio Seco	Córdoba	NO	1	0	0	0	0	1
Vulpiani	San Luis	NO	1	0	0	0	0	1
Futaleufú	Chubut	SI	1	0	0	0	0	1
Piedra del Águila	Neuquén - Rio Negro	SI	1	0	0	0	0	1
Calancates	Catamarca	NO	0	0	0	0	0	0
Chuscha	Salta	NO	0	0	0	0	0	0
El Cajón	Chubut	NO	0	0	0	0	0	0
Guayamba I	Catamarca	NO	0	0	0	0	0	0
Guayamba II	Catamarca	NO	0	0	0	0	0	0
Ipizca	Catamarca	NO	0	0	0	0	0	0
Los Indios	La Rioja	NO	0	0	0	0	0	0
Saltito I	Misiones	NO	0	0	0	0	0	0
Saltito II	Misiones	NO	0	0	0	0	0	0
Yerba Buena	Catamarca	NO	0	0	0	0	0	0

Por su parte, de los 57 proyectos en cartera que fueron inventariados, 15 (26 %) presentan un grado de susceptibilidad a presentar complicaciones geológico - geotécnicas elevada a muy elevada.

En el caso de las 340 presas ya construidas, este porcentaje alcanza el 30 %, con 101 aprovechamientos.

En este análisis no pudieron ser incluidas las presas arroceras, ni las de relave minero. Estas últimas de suma importancia desde el punto de vista del riesgo asociado, estando muchas de ellas emplazadas en zonas clasificadas como de elevada o muy elevada susceptibilidad.

Entre los 15 proyectos mencionados anteriormente, la presa Condor Cliff (ex Néstor Kirchner), actualmente en ejecución, puede ser considerada como un caso paradigmático que expone, por un lado, la utilidad de una herramienta como la aquí presentada, y por otro, la necesidad imperiosa de cumplir con todas las etapas de anteproyecto preestablecidas, en forma previa al lanzamiento licitatorio de una obra de magnitud (Organismo Regulador de Seguridad de Presas 2016, 2020).

De esta manera, la detección de zonas geológicamente inestables, podría ser tomada por aquellos organismos del Estado Nacional encargados de gestionar y regular proyectos hidroeléctricos y multipropósito, como herramienta para la priorización de inversiones en estudios básicos y tareas sistemáticas de auscultación. De igual manera, podría servir como base para el cálculo presupuestario de futuras licitaciones, en virtud de la identificación de potenciales problemas constructivos.

Identificadas las regiones de mayor susceptibilidad a nivel de inventario, se propone una segunda etapa de proyecto, que podríamos denominar de prefactibilidad, siguiendo la nomenclatura clásica en las fases de un gran proyecto ingenieril (Casajús et al. 1982).

Para esta fase futura, se plantea la necesidad de recopilar y analizar información geológico - geotécnica de aquellos proyectos emplazados en las regiones de mayor susceptibilidad, prestando especial atención a la detección de características geotécnicas de relevancia, tanto en las zonas de cierre, como en sus embalses, destacándose la presencia de terrenos expansivos, dispersivos, licuables, solubles, o también fácilmente erosionables, altamente cizallados, o bien aquellos que presenten una baja resistencia, o rigidez. Por otra parte, se plantea incrementar la información disponible sobre los proyectos, identificando en cada caso, el tipo de presa, el tamaño, volumen de embalse, su utilización, entre otros parámetros de relevancia que indiquen la importancia de cada aprovechamiento y las consecuencias de su potencial falla.

AGRADECIMIENTOS

El presente artículo se enmarca dentro del proyecto de I+D+i de la Universidad Tecnológica Nacional ECUTI-BA0004719TC, denominado “Comportamiento geomecánico de rocas débiles como macizo de fundación de presas de embalse en la República Argentina”. Los autores desean expresar su especial agradecimiento a la Facultad Regional Buenos Aires, por el apoyo brindado.

El editor agradece la tarea de revisión realizada por Luis Mario Giaconi y Fabio Luna.

REFERENCIAS

- Casa, A., Yamin, M., Wright, E., Costa, C., Coppolecchia, M., Cegarra, M. y Hongn, F. 2014. Deformaciones cuaternarias de la República Argentina, Sistema de Información Geográfica. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino, v2.0, DVD.
- Casajús, J., Di Salvo, C., Siches, C. y Turazzini, G. 1982. Fases de la investigación geotécnica en la concepción de presas: Una propuesta metodológica de trabajos hasta el nivel de prefactibilidad. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Acta 2: 19-30.
- Celli, A.E. 2014a. Presa Presidente Néstor Kirchner. Análisis de aspectos geomecánicos a estudiar. Organismo Regulador de Seguridad de Presas (inédito), 7 p., Buenos Aires.
- Celli, A.E. 2014b. Presa Presidente Néstor Kirchner. Lineamientos en relación a los estudios geológico – geotécnicos. Organismo Regulador de Seguridad de Presas (inédito), 8 p., Buenos Aires.
- Celli, A.E. 2015. La geología y las presas: Conceptos Clásicos y Nuevas Tendencias. 11° Simposio de Geología Aplicada a la Ingeniería y el Ambiente, Actas electrónicas.
- Celli, A.E. 2018. Presa El Cajón, provincia de Tucumán. Informe sobre la comisión efectuada entre los días 11 y 12 de diciembre de 2017. Organismo Regulador de Seguridad de Presas (inédito), 32 p., Buenos Aires.
- Dearman, W., Dobbs, M., Culshaw, M., Northmore, K., Entwisle, D. y Reeves, H. 2011. Engineering Geology Map of the United Kingdom. British Geological Survey, Nottingham.
- Emprendimientos Energéticos Binacionales S.A 2017. Inventario de Aprovechamientos Hidroeléctricos Estudiados. Integración Energética Argentina S.A. –IEASA-. <http://ide.ebisa.com.ar/geoserver/wfs>
- González, M.A. y Bejerman, N.J. 2004. Peligrosidad Geológica en Argentina: Metodología de análisis y mapeo. Estudio de casos. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Publicación Especial 4, 528 p., Buenos Aires.
- Grunbaum, J. 1989. Optimización de las inversiones en estudios geotécnicos para grandes obras. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Acta 4: 16-25.

- Hayeur, G. 2001. Summary of knowledge acquired in northern environments from 1970 to 2000. Hydro-Québec, 113 p., Montreal.
- ICOLD 1999. Dam failures. Statistical analysis. International Commission on Large Dams, Bulletin 99, 76 p., París.
- ICOLD 2005. Dam foundations. Geologic considerations. Investigation methods. Treatment. Monitoring. International Commission on Large Dams, Bulletin 129, 493 p., París.
- ICOLD 2019. World declaration on dam safety. Better dams for a better world, 2 p., Porto. https://www.icold-cigb.org/userfiles/files/World%20declaration/World%20Declaration%20on%20Dam%20Safety_ICOLD_A3.pdf
- Instituto Geográfico Nacional. (n.d.). ANIDA. Atlas Nacional Interactivo de Argentina <https://anida.ign.gov.ar>.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica 2013. Zonificación sísmica de la República Argentina. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. Parte 1: Construcciones en general: Anexo: Adenda. Series: Reglamento INPRES-CIRSOC, 103. 1. Publicado por: INTI-CIRSOC, Buenos Aires. <http://contenidos.inpres.gov.ar/acelerografos/Reglamentos#ZonificacionSismica>
- Massabie, A.C. y Capdevila, E.O. 1989. Presencia de yeso en un tramo de las fundaciones de la presa Casa de Piedra. Aplicación de una metodología de investigación geotécnica. Adecuación del diseño de la presa. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Acta 4: 16-25.
- Menéndez Arán, D., Rodríguez Diez, A. y Goyheneche, P. 2018. Hacia la consolidación de un consenso en la industria: Definición de las etapas de ejecución en proyectos hidroeléctricos. 9° Congreso Argentino de Presas y Aprovechamientos Hidroeléctricos, Actas electrónicas, 14 p., Mendoza.
- Ministerio de Energía y Minería de la Nación 2018. Inventario de Presas y Centrales Hidroeléctricas de la República Argentina. Secretaría de Coordinación de Planeamiento Energético. Dirección Nacional de Información Energética. Tecnología de la Información. <http://datos.minem.gov.ar/dataset/inventario-de-presas>.
- Organismo Regulador de Seguridad de Presas 2016. Proyecto Río Santa Cruz. Presas Presidente Néstor Kirchner y Gobernador Jorge Cepernic. Resumen de tareas desarrolladas por Organismo Regulador de Seguridad de Presas durante el período octubre 2013 – mayo 2016 (inédito), 325 p., Buenos Aires.
- Organismo Regulador de Seguridad de Presas 2018. Inventario de presas y azudes fiscalizados y no fiscalizados por el Organismo Regulador de Seguridad de Presas. Sistema de Información Geográfica (inédito), Buenos Aires.
- Organismo Regulador de Seguridad de Presas 2020. Proyecto Río Santa Cruz. Presas Condor Cliff / Néstor Kirchner y La Barrancosa / Jorge Cepernic. Resumen de tareas desarrolladas por el Organismo Regulador de Seguridad de Presas durante el período junio 2016 – abril 2020 (inédito), 732 p., Buenos Aires.
- Sistema de Información Geográfica Ambiental Minera 2018. Servicio Geológico Minero Argentino. <https://sigam.segemar.gov.ar/visor/>
- Sistema Nacional de Gestión Integral del Riesgo 2018. Plan Nacional de Reducción del Riesgo de Desastres 2018 – 2023. Ministerio de Seguridad de la Nación, 77 p., Buenos Aires.
- Speziale, J. 1989. Grandes obras hidráulicas: ¿Cuánta investigación geotécnica? Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería Actas 4: 7-15.