

# PELIGRO Y RIESGO SÍSMICO APLICADO A PROYECTOS MINEROS

Patricio Pineda Nalli

Santiago, 13 de Agosto de 2015

# TEMAS

---

- **Definiciones**
- **Tipos de Estudios**
- **NCh2369.Of2003**
- **Comportamiento Sísmico en Interior de Cavernas**
- **Conclusiones**

An aerial photograph of a large-scale open-pit mine. The mine is characterized by numerous terraced levels or benches, showing the extensive excavation. In the foreground, a yellow haul truck is driving on a dirt road. The background features rugged, snow-dusted mountains under a clear blue sky. The entire image has a semi-transparent grey overlay.

# DEFINICIONES

# Aspectos Principales

---

**Amenaza/Peligro Sísmico (H)**: Probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico de cierta magnitud para un sitio en estudio, durante un período de tiempo específico.

**Riesgo (Rs)**: Probabilidad de que se produzcan daños por un sismo de magnitud dada, en un período de tiempo específico.

# Aspectos Principales

---

**Vulnerabilidad (V)**: Conjunto de parámetros utilizados para predecir el tipo de daño estructural para un sismo determinado, modos de falla y resistencia:

$$R_s = H \times V$$

# Aspectos Principales

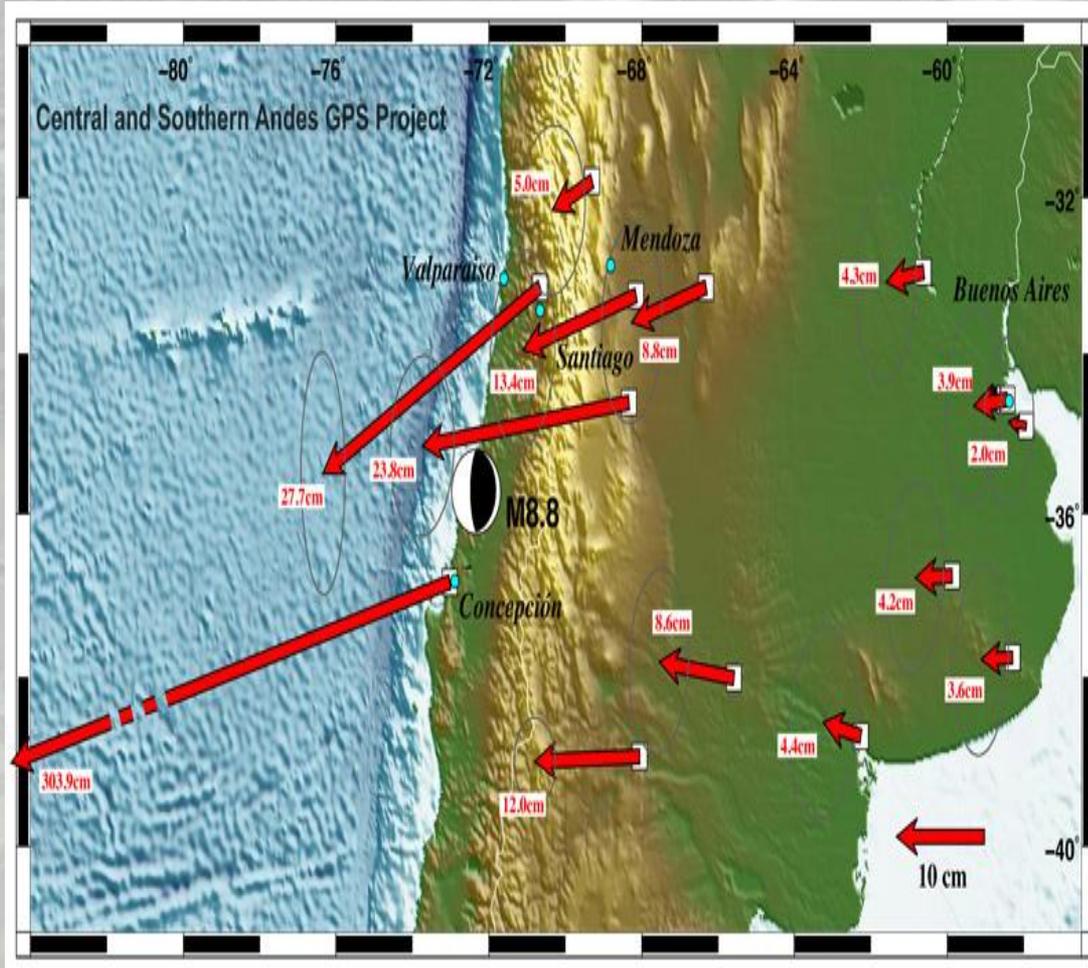
---

**Probabilidad de Excedencia:** Probabilidad de que un sismo sea excedido durante un período de tiempo dado.

**Período de Retorno:** Tiempo medio entre dos sismos de magnitud mayor que un cierto valor. Recíproco de la probabilidad anual de excedencia.

# Asperezas

Área de contacto entre placas tectónicas o fallas geológicas en donde su desplazamiento relativo se encuentra temporalmente



Gran liberación de energía

Desplazamientos de (304cm)

Mediciones con GPS

# Leyes de Atenuación

---

**Disminución de la aceleración máxima del suelo (velocidades, desplazamientos, potencial destructivo) en el interior y superficie de la tierra:**

$$a := \frac{525 e^{1.2 M_s}}{R^2}$$

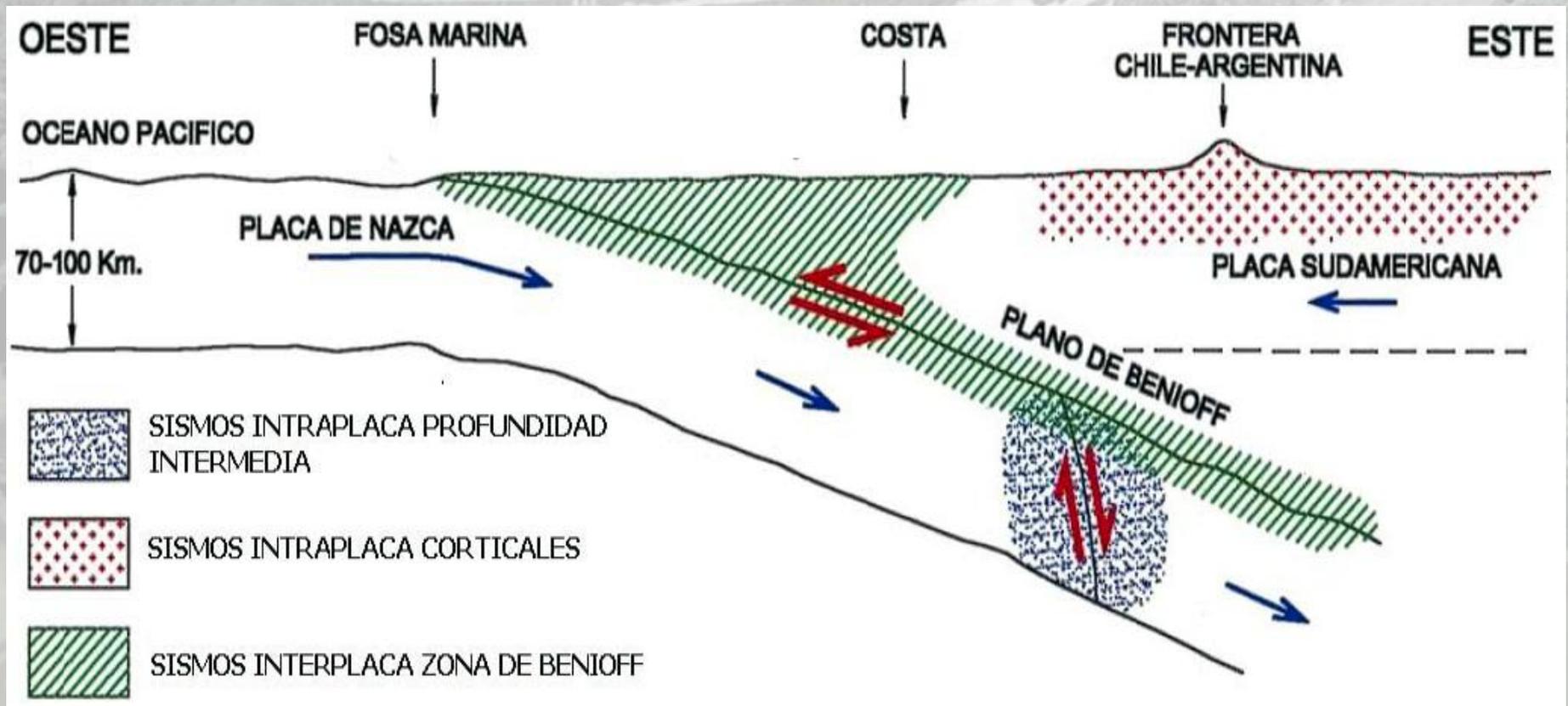
**$M_s$  : magnitud**

**$R$  : distancia hipocentral**

**Dependen de la fuente sísmica y material geotécnico**

# Fuentes Sísmicas

Zona de la litósfera capaz de generar sismos.  
Características: frecuencia de actividad y magnitud.



An aerial photograph of a large-scale open-pit mine. The mine is characterized by numerous terraced levels, creating a stepped appearance. A prominent yellow haul truck is visible on a road in the lower right quadrant. The background features rugged, snow-dusted mountains under a clear sky. The entire image has a semi-transparent grey overlay.

# TIPOS DE ESTUDIOS

# Niveles de Amenaza Sísmica

## Sismo de Operación/Servicio:

Alta probabilidad de ocurrencia durante la vida útil. Sin daños, estructuras y equipos operativos → continuidad de la operación.

## Sismo de Diseño:

Baja probabilidad de ocurrencia durante la vida útil. Se aceptan daños, instalaciones operativas en corto tiempo.

# Niveles de Amenaza Sísmica

## Sismo Máximo Creíble:

Las infraestructuras no deben colapsar. Se aceptan daños que acepten operatividad, evacuación segura. Riesgo de graves consecuencias al entorno: depósitos de lastre, relaves, etc.

## Criterio de Diseño Sísmico/Infraestructuras Especiales:

No se acepta el colapso. Obras de gran envergadura cuyas fallas generan catástrofes en la población o medio ambiente. Plantas Nucleares, estanques GNL.

# Disposiciones de Codelco



VICEPRESIDENCIA DE PROYECTOS  
GERENCIA TÉCNICA / GERENCIA DE INGENIERÍA

## SISTEMA DE GESTIÓN DE PROYECTOS

GUIA PARA PREPARACIÓN DE ESTUDIOS  
PROBABILÍSTICOS DE AMENAZA SÍSMICA  
DCVP-000-VPGT-00000-GUIIS04-0000-001

Desarrollado por:	Firma	Área
P. Pineda N.		Gerencia Técnica
A. Urzúa M.		Experto Geotécnico - Prototype
<b>Revisado por:</b>		
Sergio Barrientos		Director Servicio Sismológico Nacional
Ramón Montecinos		Revisor Sísmico
Rafael Riddell		Jefe Depto. Ing. Estructural y Geotécnica PUC

Validado por:	Firma	Área
J. Beniscelli T.		Gerencia Técnica
B. Lértora D.		Gerencia de Ingeniería

Aprobado por:	Cargo	Firma	Fecha
Sergio Fuentes S.	Vicepresidente de Proyectos		22/11/10

# Niveles de Amenaza Sísmica

**P** : Probabilidad de excedencia durante la vida útil

**t** : Vida útil en años (50 años)

**T<sub>s</sub>**: Período de Retorno en años

P (%)	T <sub>s</sub> (años)	Tipo Sismo
10	475	Sismo de Operación
5	975	Sismo de Diseño
2	2475	Sismo Máximo Creíble
1 – 0.5	4975 – 9975	Criterio de Diseño Sísmico para Infraestructuras Especiales

# Niveles de Amenaza Sísmica

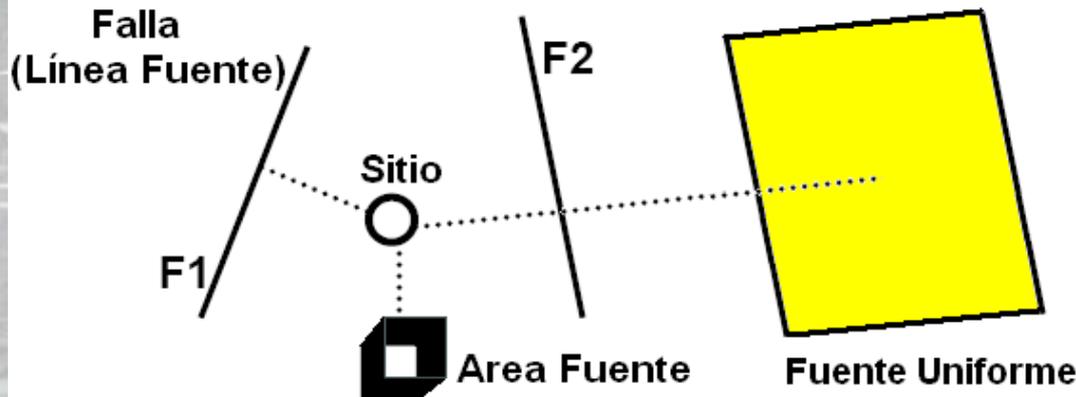
**P :** Probabilidad de excedencia durante la vida útil (10%)

**t :** Vida útil en años

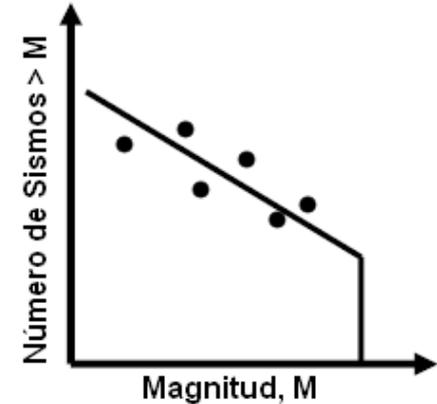
**T<sub>s</sub> :** Período de Retorno en años

t (años)	T <sub>s</sub> (años)
10	95
15	143
25	238
50	475

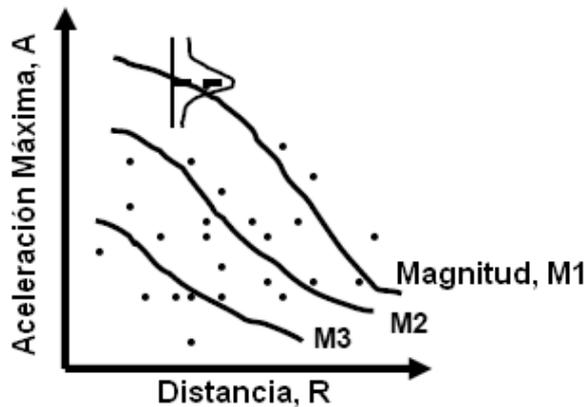
# Probabilístico



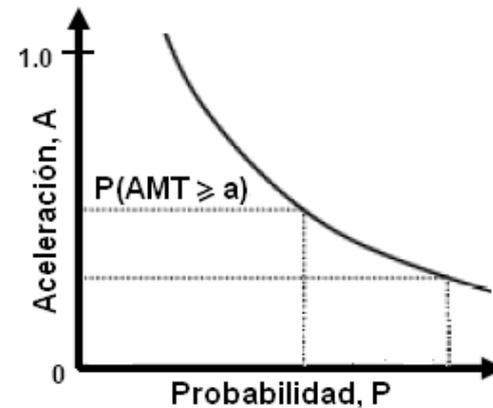
**ETAPA 1 - FUENTES SÍSMICAS**



**ETAPA 2 - LEY DE RECURRENCIA (GUTENBERG & RICHTER)**



**ETAPA 3 - LEYES DE ATENUACIÓN (INCLUYENDO INCERTEZA)**



**ETAPA 4 - PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA PARA UN PERÍODO DE TIEMPO DETERMINADO**

# Determinístico (Ministro Hales)

## Caracterización de Fuentes Sísmicas (terremotos históricos)

### Leyes de Atenuación (Suelo Duro)

Interplaca Subductivo Thrust  
(M=8.8 : R=150km)

$$a = \frac{2 \cdot e^{1.28 \cdot M_s}}{(R + 30)^{1.09}} = 542.9 \text{ cm/seg}^2$$

$a_{\max} = 0.55 \text{ g}$

Intraplaca Profundidad Intermedia  
(M=8.0 : R=100km)

$$a = \frac{565898 \cdot e^{1.29 \cdot M_s}}{(R + 80)^{3.24}} = 846 \text{ cm/seg}^2$$

$a_{\max} = 0.86 \text{ g}$

Intraplaca Profundidad  
Intermedia (M=6.5 : R=50km)

$$\ln(y) = -1.274 + 1.1 \cdot M - 2.1 \cdot \ln(\text{dist} + e^{-0.48451 + 0.524 \cdot M})$$

$a_{\max} = 0.05 \text{ g}$

# Determinístico (Ministro Hales)

## Potencial Destructivo

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \cdot \frac{\int_0^{t_0} a^2(t) \cdot dt}{v_0^2}$$

$a(t)$  : aceleración del suelo

$t_0$  : duración total del acelerograma

$v_0$  : intensidad de cruces por cero por segundo

$g$ : aceleración de gravedad

En función de la magnitud y distancia hipocentral

$$P_D = \frac{3.02 \cdot 10^{-3} \cdot e^{2M_s} \cdot e^{-0.001R}}{(R+60)^{1.39}} \quad [10^{-4} \cdot g \cdot s^3]$$

# Proyecto El Morro

se mantienen en tanto que los acelerogramas correspondientes a un terremoto subductivo interplaca tipo thrust  $M_W = 8.8$  similar al del Maule del 27 de Febrero de 2010, no superaría el potencial destructivo del terremoto subductivo intraplaca de profundidad intermedia  $M_W = 8.0$  considerando como terremoto máximo creíble (MCE)

Espectro de Diseño OBE

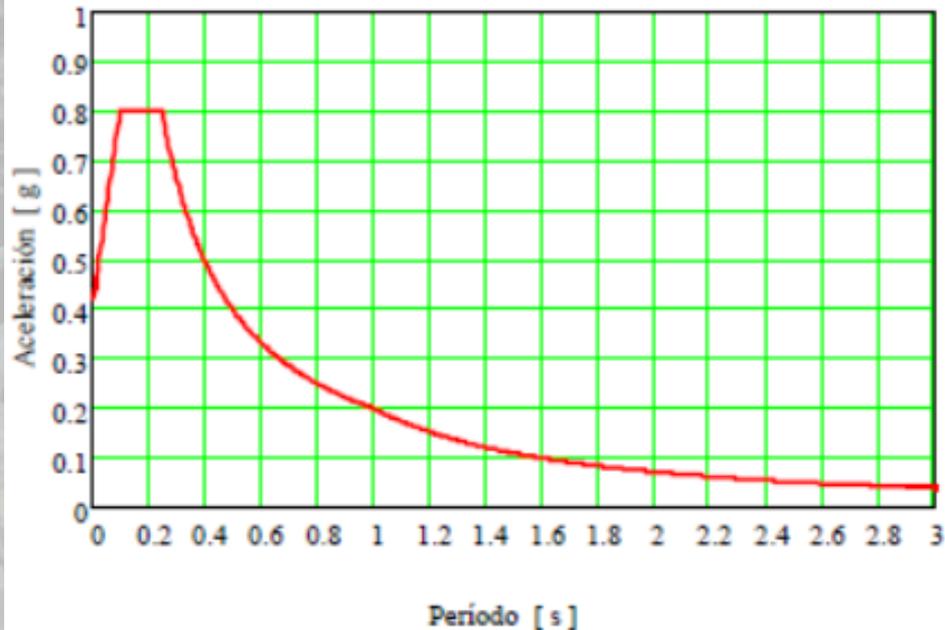


Figura 5.1: Espectro de diseño para el nivel de servicio OBE.  
(Operating Basis Earthquake).

Espectro de Diseño MCE

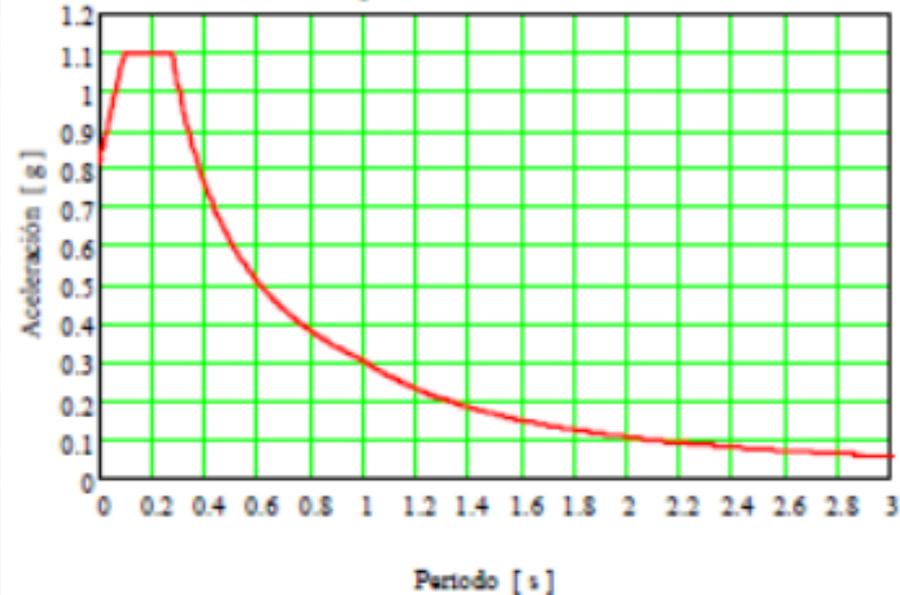


Figura 5.2: Espectro de diseño para el nivel de servicio MCE.  
(Maximum Credible Earthquake).

**NCh2369.Of2003**

**DISEÑO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS E  
INSTALACIONES INDUSTRIALES**

# Aspectos Relevantes

---

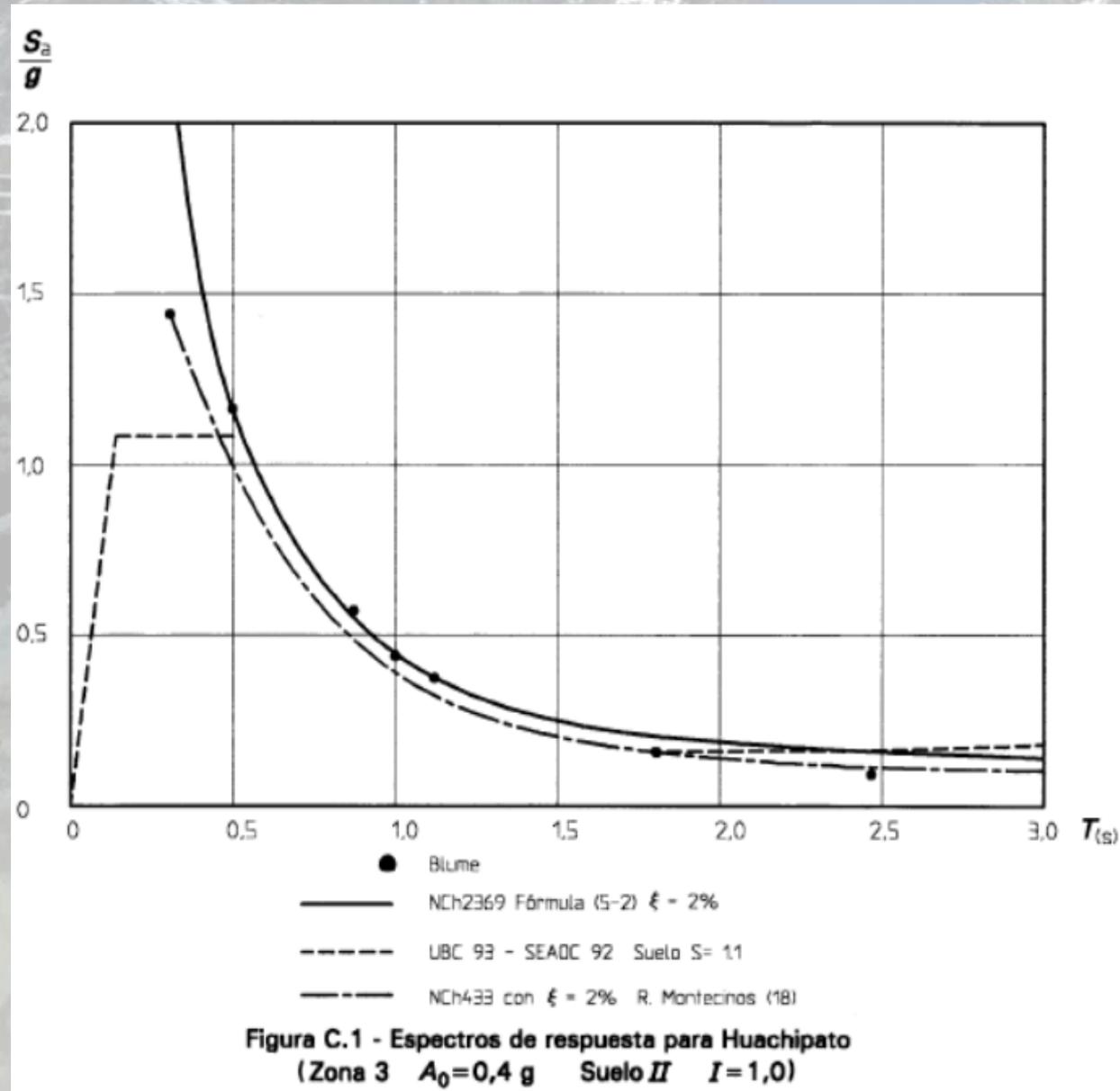
- **Edificios: Seguridad de vida de las Personas**
- **Industriales: Continuidad de la Operación**
- **J.A. Blume**

**Terremoto de Chile en 1960,  $M=9.5$  (Planta de Huachipato)**

**Espectro empírico de la respuesta sísmica para análisis de 16 estructuras (daños menores)**

**Chimeneas de acero, estanques elevados y recipientes de proceso**

# Aspectos Relevantes



**J.A Blume:**  
**Backward Analysis**

**Zona 3,**  
**suelo tipo II**

**Coincidencia**  
**satisfactoria**

**No es necesario**  
**modificar espectros**

# Párrafo 5.8.1 “Análisis Espectrales”

## Espectros especiales:

- **Características e importancia de las obras**
- **Condiciones geotécnicas del sitio**
- **Distancia a fuentes sismogénicas**
- **Efecto de la topografía del lugar**
- **Configuración del subsuelo**

# Espectros de Diseño

---

- **Valores máximos de aceleraciones, velocidades y desplazamientos**
- **Para diferentes amortiguamientos (Tabla 5.5)**
- **Antecedentes históricos o determinísticos relacionados con el sitio en estudio**
- **Complemento con valores probabilísticos con sismos de  $T_s=100$  años??**

# Aspectos Relevantes

---

## Limitaciones de Diseño:

$$75\% > Q_0 \text{ (Corte Basal)} > 125\%$$

Valores obtenidos de párrafo 5.4

Considerando suelos tipo I al IV

Si no cumple lo anterior, considerar efectos de amplificación dinámica: grandes rellenos de material geotécnico

An aerial photograph of a large-scale open-pit mine. The mine is characterized by numerous terraced levels of rock, creating a stepped appearance. In the foreground, a large yellow haul truck is visible on a dirt road. The background features rugged, snow-capped mountains under a clear blue sky. The entire image has a semi-transparent white overlay.

# COMPORTAMIENTO SÍSMICO EN INTERIOR DE CAVERNAS

# Aspectos Generales

- Chile país con mega proyectos mineros y gran cantidad de instalaciones en cavernas

<u>Proyecto</u>	<u>Producción<sup>(1)</sup></u>	<u>Inversión</u>
Andina Fase II	680 ktpa	US\$6.808
Nuevo Nivel Mina	434 ktpa	US\$3.424
Mina Chuquicamata Subterránea	320 ktpa	US\$4.200

(1) Toneladas de cobre fino al año

# Aspectos Generales

---

## Proyecto

**Andina Fase II**

**Nuevo Nivel Mina**

**Mina Chuquicamata  
Subterránea**

## Túneles

**50km**

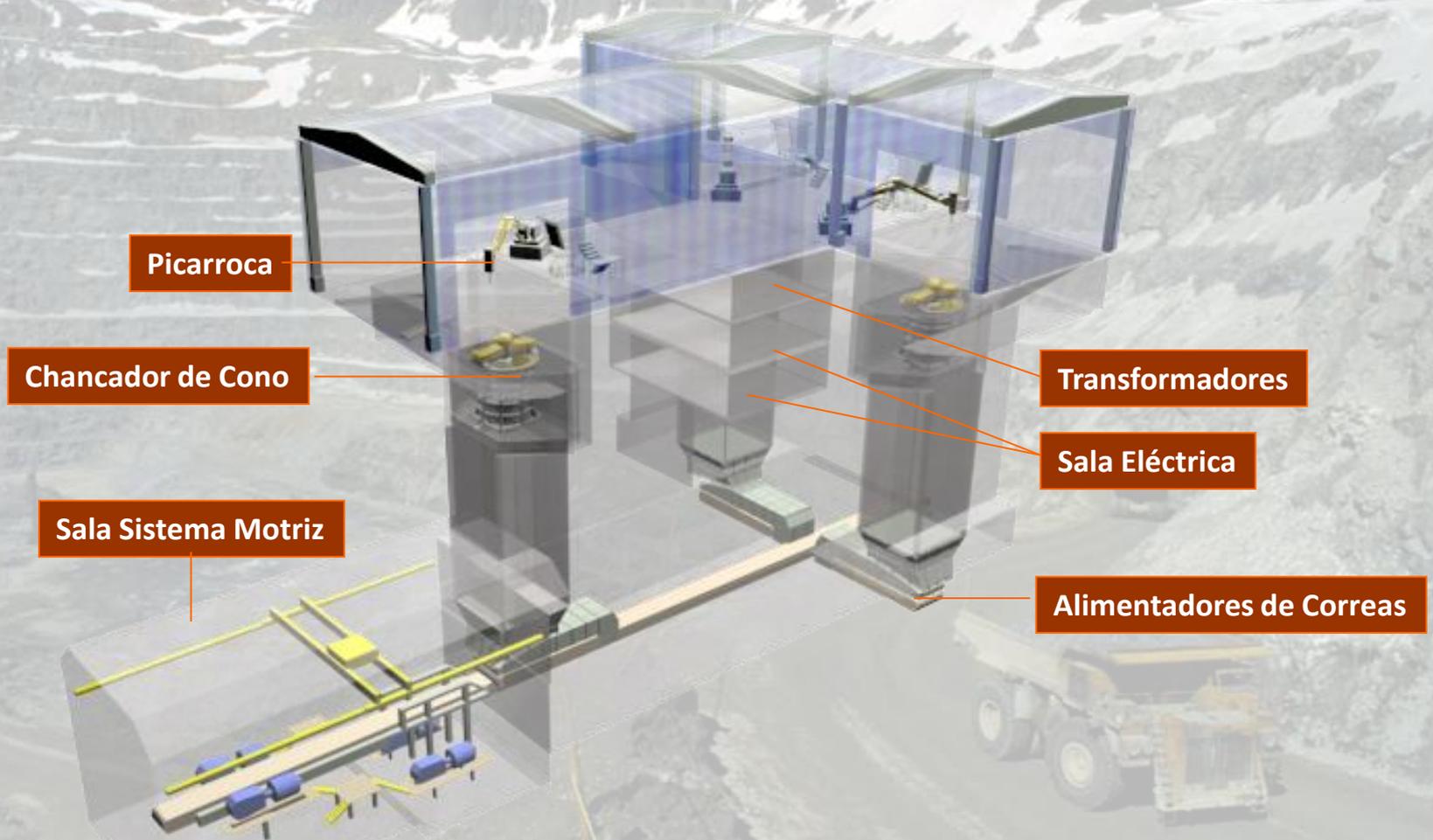
**2 x 9km**

**1.020km al año 2060**

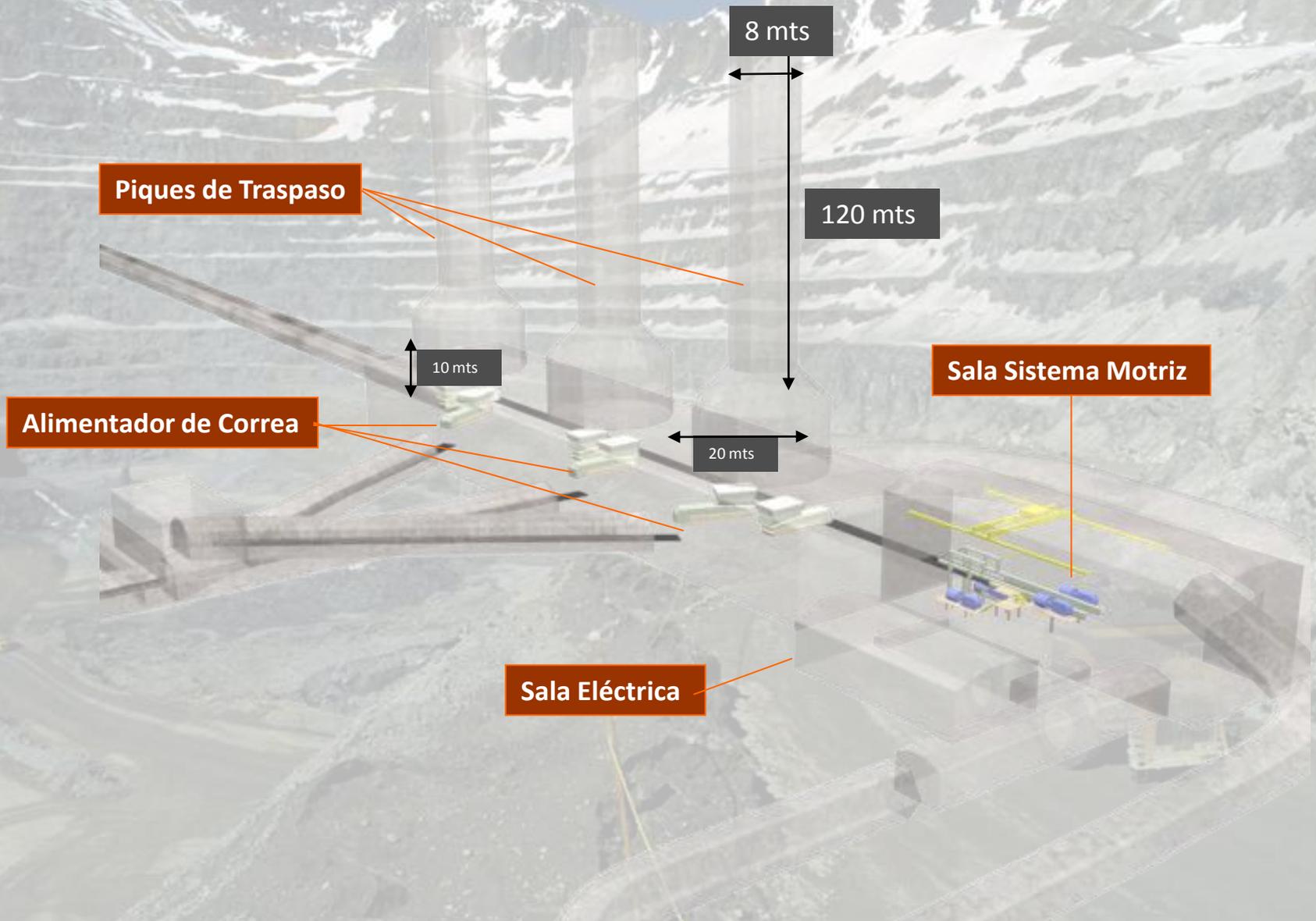
**“1.200 km de túneles  
en los próximos 5 años  
(Codelco)”**



# Chancado Primario



# Piques de Traspaso de Mineral



# Área de Chancado



# Preguntas de Proyectos

---

**“¿Se usa NCh2369 o Estudio de Riesgo sísmico?”**

**“¿Hay norma que aborde el comportamiento de infraestructuras subterráneas?”**

**“¿Hay información suficiente disponible?”**

**“¿Hay amplificación de suelos?”**

# Diseño Actual en Cavernas

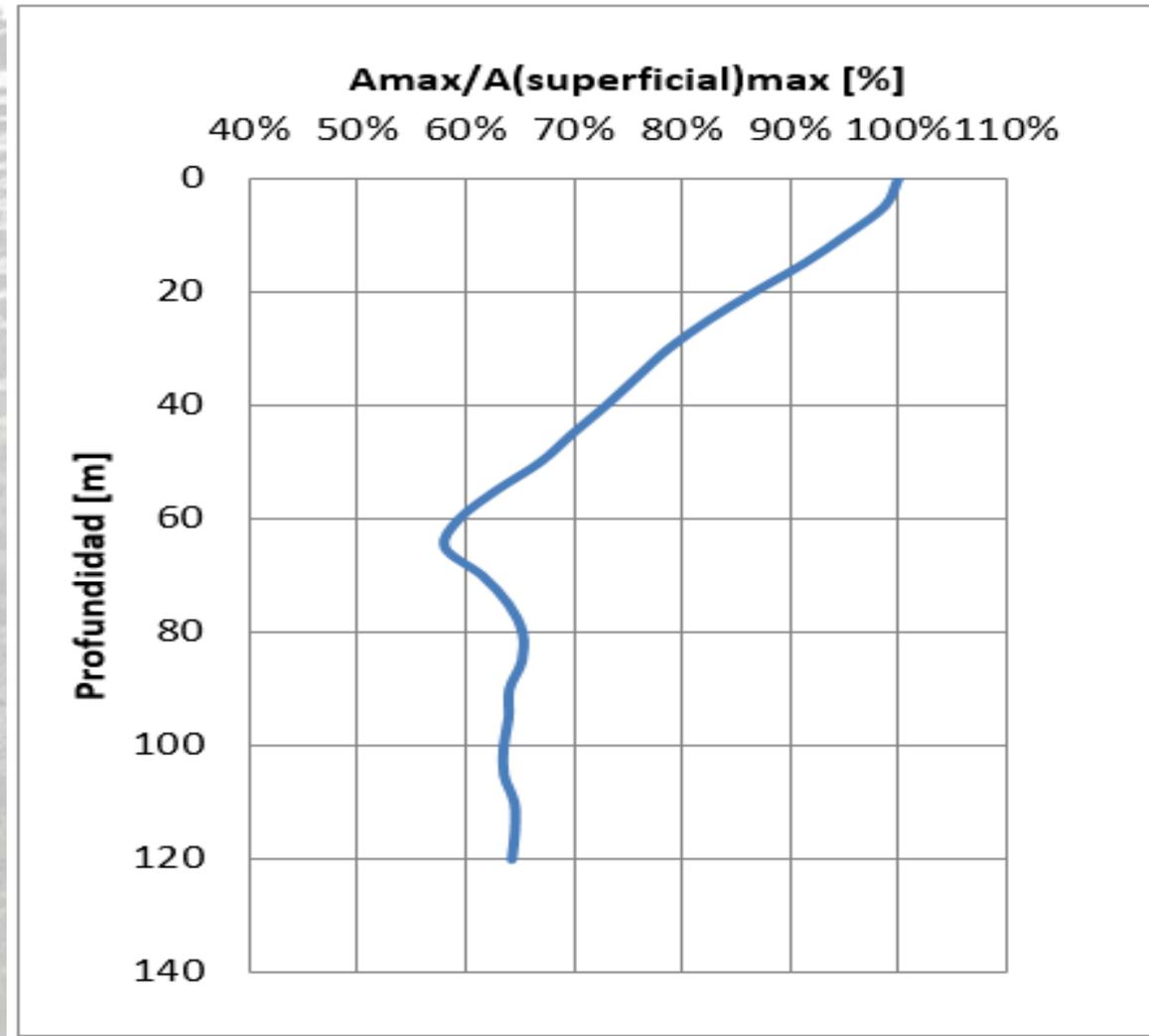
---

- **En Chile, no existe una norma que aborde el comportamiento de infraestructuras subterráneas.**
- **Diseños se realizan con NCh2369.Of2003.**
- **Uso de registros y espectros en superficie.**
- **Consideran efectos dinámicos de superficie y de sitio.**
- **Diseño sísmico en cavernas es menos exigente.**

# Conclusiones

- Hay una reducción de aceleraciones a mayor profundidad.

**Reducciones de Aceleraciones del orden de 30% (superficie) a 60m de profundidad.**



# Diseño Actual en Cavernas

---

- **Reducción de aceleraciones:**  
**75% (NCh2369 - 5.8.1) < parámetro estudio**
- **Alta sismicidad en Chile, tasas de daños menores que en instalaciones superficiales**
- **En algunos casos el diseño no es controlado por el sismo:**
  - “Detonaciones, evaluar distancias a la fuente y efectos”
  - “Vibraciones por operación de equipos”

An aerial photograph of a large-scale open-pit mine. The mine is characterized by numerous terraced levels, creating a stepped appearance. In the foreground, a large yellow haul truck is visible, carrying a load of material. The surrounding landscape is rugged and mountainous, with patches of snow or light-colored rock on the slopes. The sky is clear and blue.

# CONCLUSIONES

▪ **ERS versus NCh2369.Of2003**

**Geotécnia, sismología → diferencias importantes**

- **No combinar Estudios - valores espectrales máximos (ejemplo):**

**Caso A (Tranque):**

**Determinístico:  $a_{\text{máx}}=0.74\text{g}$**

**Caso B (Tranque, Planta, Puerto):**

**Determinístico:  $a_{\text{máx}}=1.37\text{g}$**

**Probabilístico:  $a_{\text{máx}}=1.02\text{g}$**

- **Se deben desarrollar ERS para instalaciones y obras de retención por separado**

**Agrega valor al proyecto, previo a la ingeniería:**

- **Geotécnia, sondajes, estudios de amplificación dinámica**
- **Definir criterios y parámetros sísmicos con el cliente y revisor**



**GRACIAS POR SU ATENCIÓN**

[ppineda@hatch.com](mailto:ppineda@hatch.com) / [ppinedan@gmail.com](mailto:ppinedan@gmail.com)

 **HATCH™**