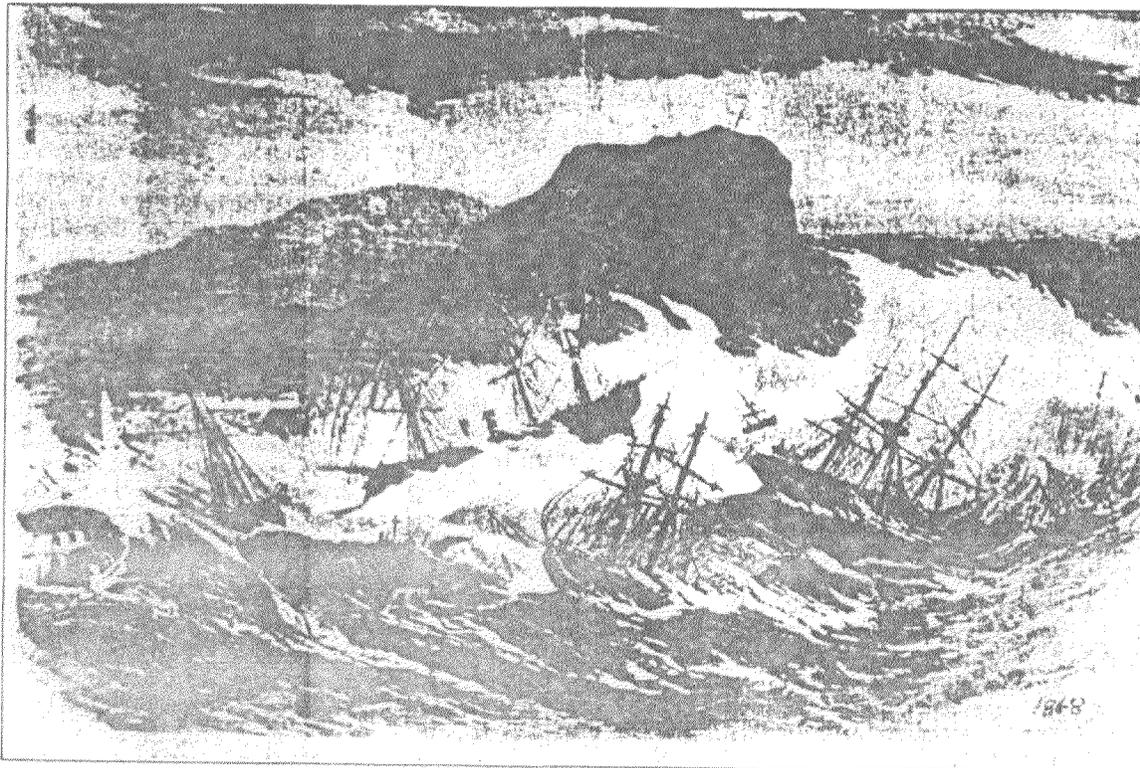


**"Documento original en mal estado"**

# EL GRAN SISMO DEL NORTE: ¿UNA PREDICCIÓN POSIBLE?

EDGAR KATISEL (Dpto. Geofísica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile)



*El terremoto de Arica de 1868 es uno de los más grandes que han azotado dicha ciudad desde su fundación. Fue acompañado de un maremoto cuyos efectos se hicieron sentir incluso en las costas de Japón y Hawái. La ilustración es una interpretación dramática de los estragos que dejó en el puerto. A la izquierda se observa en los edificios de Aduana, y más atrás la Iglesia Matriz que fue destrozada por la violencia de las aguas.*

Un evento sísmico y su posterior radiación en forma de ondas sísmicas, se produce como consecuencia de una liberación repentina y espontánea de energía acumulada en el interior de la tierra. Para la mayoría de los sismos importantes, la energía potencial acumulada está asociada a un aumento paulatino de tensiones y deformaciones en torno a zonas de fallas. Durante la ocurrencia de un sismo, una fracción de la energía

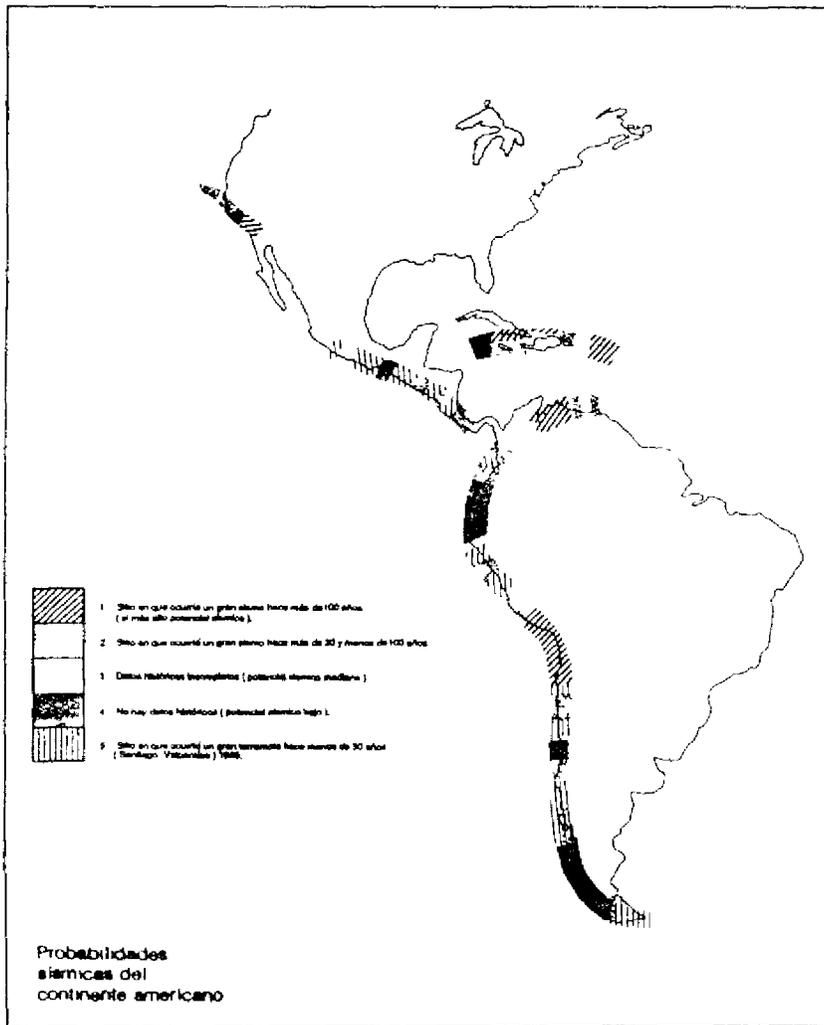
■ **El 9 de marzo de 1877 se produjo el último gran terremoto en el norte grande de Chile. A partir de esa fecha se comenzó a preparar el siguiente gran sismo. ¿Habrá llegado la hora?**

original se libera en forma de ondas sísmicas. El resto se consume como resultado del roce entre ambas caras de la falla, en forma de energía calórica, mecánica, etc.

Grandes terremotos se repiten en una misma zona con intervalos de decenas o centenas de años. En Chile, este periodo de recurrencia es del orden de un siglo. Luego de ocurrir un gran terremoto, se inicia un largo proceso de acumulación de energía, de

## SISMOS ACOMPAÑADOS CON MAREMOTO ZONA ARICA-IQUIQUE

22 Enero 1582	Gran terremoto Arequipa, pudo afectar Arica (¿Tsunami?)
24 Noviembre 1604	Gran terremoto Arica. Puerto fue totalmente destruido por tsunami. La ciudad fue reconstruida en el sitio actual, al pie del Morro. M de Richter $8\frac{1}{4}$ - $8\frac{1}{2}$
16 Septiembre 1615	Terremoto Arica con posible tsunami no muy severo M de Richter $7\frac{1}{2}$
10 Marzo 1681	Terremoto similar al anterior. Sin tsunami M = $7 - 7\frac{1}{2}$ Epicentro Arica
13 Agosto 1868	Gran terremoto y maremoto. Epicentro Tacna - Arica M = 8.5
24 Agosto 1869	Terremoto con pequeño tsunami. Epicentro entre Arica e Iquique M = $7 - 7\frac{1}{4}$
5 Octubre 1871	Terremoto en Iquique, sin maremoto M = $7 - 7\frac{1}{2}$
9 Marzo 1877	Gran terremoto y tsunami. Epicentro cerca de Iquique (Pabellón de Pica) M = $8\frac{1}{4}$ □



deformación de las rocas litosténicas que culmina con la ocurrencia de un nuevo gran sismo completando lo que se conoce como un ciclo sísmico. Este ciclo se acostumbra a subdividir en tres períodos presísmico, cósmico y postsísmico, los que se identifican respectivamente con los procesos de acumulación de energía, liberación de energía (terremoto) y ajuste final acompañado de réplicas.

El largo período presísmico se caracteriza por una lenta deformación de las rocas al interior de la futura zona hipocentral, que se traduce además en una paulatina, lenta e imperceptible deformación de la superficie terrestre. El período cósmico es de muy corta duración, no más de algunos minutos, y en él se desarrolla el proceso de ruptura sobre la superficie de falla. En breves instantes, a partir de un punto inicial de ruptura, **el hipocentro**, se generaliza el fallamiento de la roca caracterizado por un desplazamiento relativo de algunos metros de los bloques rocosos a ambos lados de la superficie de falla. La ruptura puede abarcar cientos de kilómetros a lo ancho y largo de la falla, y suele causar deformaciones topográficas permanentes fácilmente identificables. El período postsísmico se caracteriza por una acomodación final de las tensiones remanentes en la zona hipocentral, lo que se manifiesta en una gran cantidad de sismos conocidos como réplicas.

Uno de los casos más extraordinarios de deformaciones superficiales cósmicas se produjo con ocasión del terremoto del 22 de mayo de 1960 en el sur de Chile. Casi 1000 kilómetros de costa, entre Puerto Saavedra y la Península de Taitao sufrió un hundimiento permanente de 2 a 3 metros en promedio y algunas islas (Mocha, Guafo, Guambin) experimentaron levantamiento de hasta 8 metros. Las consecuencias de estos cambios topográficos permanentes fueron de extraordinaria importancia y aun hoy, después de casi 30 años todavía permanecen terrenos inundados que no han podido ser recuperados.

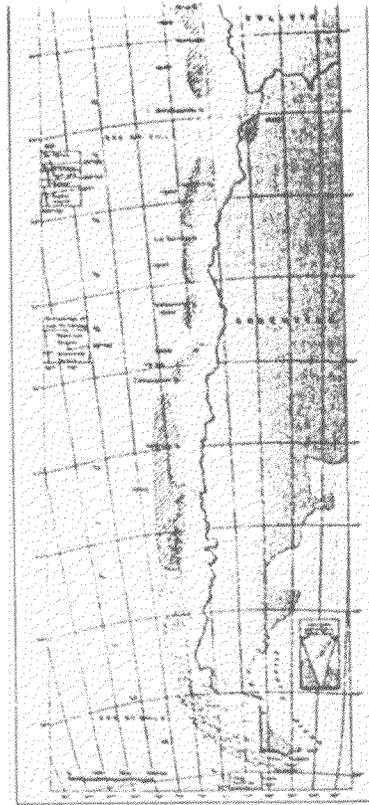
La situación descrita no es

nueva. La historia sísmica de Chile muestra que en numerosas ocasiones las costas han experimentado sollevamientos o hundimientos detectables a simple vista. Varios terremotos fueron acompañados además por **tsunamis** o maremotos, cuyo origen está relacionado justamente con deformaciones bruscas del fondo marino. Terrazas marinas a lo largo de nuestras costas atestiguan que estos movimientos no sólo han ocurrido en períodos históricos, sino que se vienen produciendo desde la iniciación del proceso de subducción de la placa de Nazca bajo el continente sudamericano, proceso tectónico de dimensiones globales que constituye la causa primaria de la generación de terremotos de nuestro planeta.

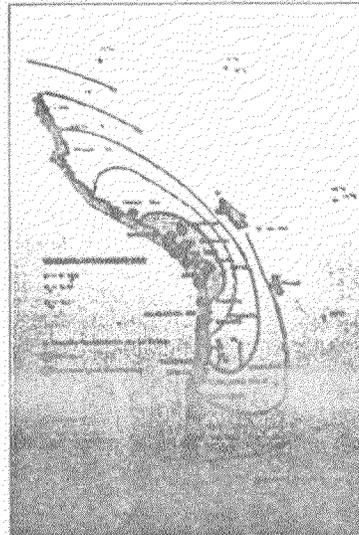
Miles de años, decenas de miles de años son períodos de tiempo muy cortos en la historia geológica terrestre. Los procesos tectónicos no evolucionan muy rápidamente, de manera que sus características pueden considerarse estacionarias en períodos cortos. Chile es un país de temblores y así permanecerá sin variaciones apreciables en los próximos milenios. Mas aun, los sísmólogos han acumulado recientemente evidencias que reafirman la idea que los grandes terremotos se repiten casi siempre en los mismos lugares geográficos, con características y efectos similares y con períodos de recurrencia más o menos constantes.

### LA BRECHA SISMICA

Se define como **brecha o hiatus sísmico** a una zona geográfica reconocida como sísmica, pero donde ha transcurrido un tiempo muy largo sin que la región haya experimentado un sismo importante. La brecha sísmica es, en cierto modo, la primera aproximación a una predicción. La predicción de un sismo solo es tal, si simultáneamente se especifica el lugar donde ocurrirá el temblor (zona epicentral), la fecha de ocurrencia y el tamaño (magnitud). No constituye predicción, por ejemplo, si se anuncia un gran terremoto en un lugar

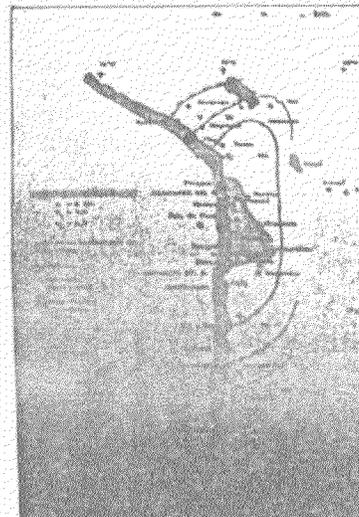


En una misma localidad los terremotos de magnitud Richter igual o mayor que 8, ocurren en Chile una vez cada 80-100 años. La figura muestra el último gran terremoto de M 8 en cada región del país. En la zona de Valparaíso se muestra el terremoto de 1906. Debe ser reemplazado ahora por el terremoto de marzo, 1985. Se observa que la región donde ha transcurrido más tiempo desde el último gran sismo corresponde a la región Iquique-Arica. Constituye dicha zona la mayor 'brecha sísmica'. La siguen Atacama (1922), Talca (1928), Chillán (1939) en ese orden. El terremoto de 1960 ocurrió sólo 28 años atrás, por lo que es poco probable que se repita en las próximas décadas. Es igualmente poco probable que un gran sismo ocurra en la zona de Valparaíso en el próximo medio siglo.



Los últimos grandes terremotos ocurridos en la 1ª y 2ª Regiones del país datan de 1928 (Arica) y 1877 (Iquique). Ambos sismos fueron de gran violencia y estuvieron acompañados por maremotos que dañaron gran parte del norte de Chile y sur del Perú. Las figuras muestran los datos que han podido recopilarse a partir de crónicas, diarios de la época y estudios científicos. Con ellos se han podido reconstruir las curvas isosistas y estimar algunos parámetros focales como magnitud de la ruptura (falla tectónica) y efectos del maremoto. La zona de mayor daño del terremoto de 1868 abarcó unos 450 km de extensión Norte-Sur, incluyendo al Puerto de Arica, mientras que el terremoto de 1877 tuvo su epicentro más al sur (Pabellón de Pica) produciendo gran daño en Iquique y abarcando una zona de aproximadamente 400 km de extensión.

Los maremotos generados por estos terremotos fueron de gran magnitud, produciendo en ambas ocasiones estragos en Arica, Iquique y puertos del Perú, llegando a sentirse en las costas de California, Islas Hawái, Kamchatka y Japón. Desde 1877 la zona no ha experimentado sismos comparables por lo que se la considera una 'brecha sísmica' (ver texto).



# PRINCIPALES CONSIDERACIONES EN ALERTA DE TSUNAMI O MAREMOTOS

A pesar del desarrollo del Sistema de Alerta a lo ancho de todo el océano Pacífico, el que usa las más sofisticadas técnicas de detección, medidas y comunicación, en gran cantidad de países, incluyendo el nuestro, existen aún variados obstáculos en una rápida difusión de la alerta, especialmente a poblados, puertos, caletas y balnearios donde las redes de comunicación aún no llegan, o bien, donde la educación anti-tsunámica no existe. En tales áreas, es esencial que la población local sea informada acerca de lo que son y significan estas olas, aprenda a reconocer los signos que presagian la proximidad de un tsunami y puedan tomar acciones preestablecidas, o de su propia iniciativa. Un ejemplo del tipo de información que puede ayudar en tales situaciones son las siguientes reglas sobre seguridad anti-tsunámica, entregadas por el Departamento de Comercio de los Estados Unidos, que son aceptados ampliamente por la comunidad ribereña de la Cuenca del Pacífico. A saber:

1. No todos los terremotos causan tsunamis, pero los más grandes pueden particularmente hacerlo. Cuando usted escuche que un terremoto ha ocurrido, permanezca preparado para una emergencia de tsunami.
2. Un temblor fuerte en el área donde usted vive es una alerta natural de tsunami. No permanezca en las playas o cerca del mar.

3. Un tsunami no es una sola ola, sino una serie de olas, que pueden atacar varias horas. Permanezca fuera de las áreas de peligro hasta que una autoridad competente le indique que puede regresar.
4. La proximidad de un tsunami se puede percibir por un notorio recogimiento o bien aumento del nivel de las aguas, más allá de lo que acostumbramos ver en nuestras costas. Esta es una señal natural de la presencia de un tsunami y usted debe tomar precauciones inmediatamente.
5. Un pequeño tsunami en una playa puede alcanzar proporciones gigantescas pocos km. más allá. Que el modesto tamaño del que usted vio no le equivoque respecto de otros.
6. El sistema nacional e internacional de alerta de tsunami no entrega falsas alarmas cuando se entrega un boletín de alerta; el tsunami existe. El tsunami de mayo de 1960, originado en las costas de Valdivia, en Chile, mató 61 personas en Hilo, Hawai, las cuales seguramente pensaron que era otra falsa alarma.
7. Todos los tsunamis, igual que los huracanes, son potencialmente peligrosos y destructivos aún cuando ellos no siempre dañan todas las costas que atacan.
8. Nunca vaya a la playa a observar un tsunami. Cuando usted pueda ver la ola que se genera, será

tarde para escapar, pues son muy rápidas.

9. Más tarde o temprano los tsunamis arribarán a cada costa en el amplio océano. Serán suministradas señales de alerta si usted vive muy próximo a la línea costera.
10. Durante una emergencia, la policía, defensa civil, bomberos, las instituciones encargadas por la autoridad marítima o gubernamental, tratarán de salvarle su vida. Entregue a ellos toda su cooperación.

Una última recomendación que no es universal, pero que como chilenos podemos adoptar. Cada ciudadano que vive en las proximidades de la playa, debe comprometerse a transmitir a sus vecinos la señal de alerta que él escuchó o recibió, de esta manera tendremos la certeza de que se establecerá una cadena de información y ayuda fraterna que nos permitirá vivir y gozar de la cercanía del mar en un ambiente seguro.

JORGE RAMIREZ FERNANDEZ

Jefe proyecto  
Maremotos y Tsunami en las Costas  
del norte de Chile. Facultad de  
Ingeniería Universidad de Antofagasta

## BIBLIOGRAFIA

- RAMIREZ F. JORGE. "TSUNAMI". Revista Geográfica de Chile. Terra Australis, 29-39 Santiago, Chile, 1986
- UNITED NATIONS. "Disaster Prevention and Mitigation". Annex II. Tsunami. United Nations. N. York 1978.
- U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. "Communication Plan for the Tsunami Warning System.". Eleventh Edition. Ewa Beach, Hawai, December, 1987.

determinado pero no se especifica cuando ocurrirá, o si se aventura una fecha o lugar pero no se indica el tamaño (pequeños sismos imperceptibles ocurren más de uno diariamente)

La brecha sísmica puede considerarse como una predicción poco precisa, ya que, con ella, se especifican la zona epicentral aproximada, una estimación de la magnitud del terremoto—proporcional al área que cubre la brecha— y una estimación de la proximidad de la ocurrencia a partir del espacio de tiempo transcurrido desde el último gran sismo.

Se han hecho enormes esfuerzos para hacer uso de concepto de brecha sísmica y definir áreas de la tierra potencialmente expuestas a la ocurrencia de grandes terremotos a corto y mediano plazo.

Así, en la última década se han clasificado e identificado en el mundo zonas con diferente "potencial sísmico", a partir del registro histórico mundial. En orden descendente en cuanto al peligro de ocurrencia de un gran terremoto, se distinguen 5 categorías:

1. Sitio donde ocurrió un gran terremoto hace más de 100 años, máximo potencial sísmico.
2. Sitio de un gran terremoto menos de 100 años, pero mayor de 30 años atrás.
3. Sitio con registro histórico incompleto, pero cuyo potencial para generar un gran sismo no puede descartarse a priori.
4. Sitio sin registro histórico de grandes sismos y cuyas características tectónicas no parecen ser favorables para la generación de grandes sismos.
5. Sitio donde un gran sismo ocurrió hace más de 30 años.

Haciendo uso de esta clasificación de "Potencial sísmico" se llega a la conclusión que el norte de Chile — Sur del Perú, cumple con las características de la categoría 1. Los últimos grandes terremotos ( $M > 8$ ) ocurrieron el siglo pasado (1868 Arica, 1877 Iquique) y desde entonces no hemos tenido eventos semejantes en esa zona.

Las regiones Copiapó — Valle-

par (terremoto de Atacama 1922), Talca (1928) y Chillán (1939) la siguen en este recuento. La región de Valdivia — Puerto Montt se le considera en categoría 5— por haber experimentado el sismo de 22 de mayo ( $M = 9.5$ ) hace menos de 30 años. La brecha en Valparaíso, zona que permanecía inactiva desde 1906, se reactiva con ocasión del terremoto de marzo de 1985 por lo que hay fundadas esperanzas de que un sismo de grandes proporciones en la zona central no ocurra en las próximas décadas.

A pesar del increíble avance de la sismología a partir de los años 60— cuando se postuló por primera vez la idea de la tectónica de placas, es poco lo que sabemos sobre las características de los grandes terremotos. La tasa de ocurrencia es muy baja y no ha habido pocas oportunidades para el estudio de grandes eventos. Tal es así, que el terremoto de Valparaíso del 3 de marzo de 1985 aportó información de gran valor para la sismología e ingeniería antisísmica mundial por la importante concentración de instrumentos, especialmente acelerógrafos, que habían sido instalados entre los ríos Aconcagua y Maipo, hace algunos años. A raíz justamente de que esta zona presentaba características de alto potencial sísmico (el último terremoto había ocurrido en 1906 y se conocían terremotos históricos en 1822, 1730, 1647).

### LA DIFÍCIL PREDICCIÓN

A pesar de que en la actualidad es aún difícil y riesgoso aventurar predicciones de sismos por insuficiencia de antecedentes relacionados con los procesos que dan origen a la ruptura en la superficie de falla, no se pueden desconocer los progresos que se han alcanzado en este campo. La tectónica de placas postulada originalmente por Alfred Wegner— que mostraba diferencias fundamentales respecto al concepto actual— en su celebre publicación "El origen de los continentes y océanos" en el año 1922, constituye la base para todo el pensamiento moderno sobre predicción sísmica. A partir de ella y del

## MAGNITUD VERSUS INTENSIDAD

**LA MAGNITUD**, escala de Richter, es una medida del tamaño del sismo y de la energía liberada. Se mide haciendo uso de los registros de un sismógrafo. La escala es tal que el aumento de un grado de magnitud significa un aumento 30 veces en la energía liberada. Dos grados de diferencia en magnitud corresponden a un cambio de  $30 \times 30$ , es decir, 900 veces. En otras palabras un sismo de magnitud 7 es equivalente a 900 sismos de magnitud 5. El terremoto del 22 de mayo de 1960 en Chile es el mayor sismo registrado en el mundo en la era instrumental (últimos 100 años). Su magnitud fue 9.5 y por lo tanto comparable a 900 terremotos del tipo La Ligua de 1971, que tuvo una magnitud de solo 7.5. □

**LA INTENSIDAD**, escala de Mercalli modificada, es una medida de los efectos producidos por un sismo. Como es natural los efectos son mayores en el epicentro, donde la intensidad es por lo tanto mayor y disminuye a medida que nos alejamos de él. La escala de Mercalli es de doce grados. La escala de Richter, en cambio, no tiene tope. Un sismo tiene una sola magnitud, en cambio, a cada lugar se le puede asignar una intensidad de acuerdo a los efectos y daños observados. □

fenómeno conocido como "dilatancia" en mecánica de rocas, se han elaborado una infinidad de métodos que al menos en teoría debieran permitir reconocer con alguna antelación razonable la ocurrencia de un sismo.

Por "dilatancia" se entiende un fenómeno no lineal que se hace presente en la roca sometida a esfuerzos durante las instancias previas a la ruptura, y se manifiesta por un aumento de volumen de la roca producto de la aparición de gran cantidad de microfisuras. Este efecto desencadena a su vez una serie de fenómenos secundarios como el aumento de la permeabilidad del material sometido a esfuerzo, cambios en algunas propiedades como la susceptibilidad magnética, la velocidad de las ondas sísmicas, la conductividad eléctrica, la densidad. Se observan también fenómenos piezoelectricos, cambios en el nivel de las aguas subterráneas, aumento de la concentración de gas radón en dichas aguas, deformación de la superficie terrestre en la zona epicentral, aumento o disminución de la sismicidad normal de la roca, etc. Todos estos cambios, aunque pequeños, son en teoría susceptibles de ser medidos instrumentalmente, y por supuesto se ha comprobado también que en circunstancias favorables es posible que los animales y seres humanos puedan sentir algunos de estos fenómenos o combinaciones de ellos. Lamentablemente la teoría de la dilatancia combinada con la tectónica de placas no es todavía suficientemente entendida en sus detalles, y es por ello que muchos sismos han ocurrido sin haber sido predichos, y muchas predicciones han resultado fallidas. Los sismólogos seguirán trabajando intensamente para lograr este tan anhelado objetivo. Por el momento parece ser que los sismos se comportan como muchos seres humanos: conducta impredecible. Pero en el fondo, como bien nos lo hacen saber los estudiosos del comportamiento humano, lo impredecible es producto de un conocimiento insuficiente.

Tenemos que estudiar más

observar y medir estos fenómenos naturales con un continuado entusiasmo. Instalar estaciones sísmológicas, acelerógrafos, inclinómetros, magnetómetros, gravímetros, etc., para acumular antecedentes que permitan en un futuro no temerle a los temblores sino que poder utilizar este fenómeno de la naturaleza como atracción turística anunciando el día y lugar del próximo sismo para que el extranjero pueda disfrutarlo desde lugares de observación especialmente acondicionados para ello.

Mientras tanto es preciso hacer un seguimiento sistemático de un ciclo sísmico (pre, co y postsísmico). Como se dijo anteriormente el terremoto de Valparaíso fue muy bien registrado en nuestros instrumentos. El conjunto de datos así obtenidos constituye una fuente casi inagotable de información y de generación de nuevo conocimiento. Hasta el momento nunca en ningún lugar de la tierra se han podido registrar acelerogramas a poca distancia del foco producido por un sismo de magnitud mayor que 8 en la escala de Richter. Se especula cuáles podrían ser los movimientos del suelo extrapolando información de sismos menores (Magnitud mayor que 7), y de algunos de magnitud mayor que 7.5 y solo uno de magnitud igual a 7.8 (terremoto de Chile el 3 de marzo de 1965). Se desconoce el grado de atenuación de los movimientos con la distancia, no está claro como influyen los diferentes tipos de suelo, se postula que las aceleraciones máximas estarían acotadas, es decir, habría una saturación a partir de una cierta magnitud, lo que significaría que a partir de cierta magnitud los movimientos del terreno no seguirían aumentando. Solo la duración sería mayor.

Los parámetros indicados son de extraordinaria importancia en ingeniería antisísmica pero no han podido ser medidos hasta el momento para sismos de magnitud Richter mayores que 8. Es por ello que tiene gran significación poder monitorear la zona norte de Chile y sur del Perú, cuya historia sísmica se muestra en la Tabla N.º 1. Ello permitiría obtener informa-

*Grandes extensiones de terrenos aptos para la agricultura resultaron inundados permanentemente por el mar al norte y sur de Valdivia a raíz de los hundimientos tectónicos ocurridos con ocasión del terremoto de 1960. El hundimiento puede observarse en el balneario de Mohuín. La foto de arriba corresponde a una postal tomada antes del terremoto. La foto de abajo está tomada desde la misma ubicación un mes después del terremoto y en condiciones similares de marea. Se aprecia claramente el cambio de nivel (2 m) producido por la deformación permanente de la corteza terrestre a raíz del terremoto.*

ción de mucho valor científico y aplicado de las etapas pre, co y postsísmicas de un sismo importante aunque para ello sea necesario esperar algunas décadas. Mas aun, si en el futuro cercano los métodos de predicción progresaran más rápido que lo previsto, la información obtenida en la 1ª y 2ª regiones del país podría ser de utilidad para una posible predicción del terremoto del que tanto se ha hablado en los últimos años. ☐