



Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente • N.º 51 • 2024 • ISSN 2422-5703 • <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/revista-asagai>
Mora Castro S., Soto Bonilla G.J., Santana, G., Laporte Pirie, M. y Miranda Jenkins, P.
Conceptos, utilidad, mitos y realidades de las alarmas y pronósticos de la amenaza sísmica, desde la perspectiva de la gestión del riesgo en Costa Rica
e020, <https://doi.org/10.59069/24225703e020>

Conceptos, utilidad, mitos y realidades de las alarmas y pronósticos de la amenaza sísmica, desde la perspectiva de la gestión del riesgo en Costa Rica

Concepts, usefulness, myths and realities of earthquake hazard alarms and forecasts, from the perspective of risk management in Costa Rica

 Sergio Mora Castro^{1*}   Gerardo Javier Soto Bonilla² 

 Guillermo Santana³   María Laporte Pirie⁴   Pfo Miranda Jenkins⁵ 

* Contacto

Recibido: 27 de mayo de 2024 ▪ Aceptado: 22 de octubre de 2024 ▪ Publicado: 13 de noviembre de 2024

Resumen

El riesgo se materializa periódicamente mediante impactos sociales y económicos que obstaculizan el desarrollo de Costa Rica, ubicada en una región tectónica, activa y compleja. La sismicidad, frecuente e intensa, ha sucedido durante decenas de millones de años y no se detendrá en el futuro. En el caso de la sismicidad, el riesgo depende de las características de la amenaza (magnitud, hipocentro, mecanismo de ruptura, características y espectro de los movimientos fuertes del terreno y sus condiciones geomecánicas y topográficas) y la vulnerabilidad de los elementos expuestos (población, áreas urbanas, economía). La prioridad es cumplir con los códigos de diseño sismorresistente y planificación territorial. Estas medidas han sido exitosas, como cuando la prohibición del adobe como material de construcción redujo la vulnerabilidad de las viviendas. La pregunta "¿Sucederá un evento importante?" es innecesaria, pues sin duda lo habrá. Hacer pronósticos inciertos y abusar de la frecuencia informativa incompleta al público induce estrés, incertidumbre y afecta la actividad socioeconómica. En Costa Rica una alarma sísmica no ofrecerá más de 10 segundos para reaccionar ante terremotos locales y superficiales, y un máximo de 30 segundos, para eventos de subducción. Las alarmas pueden generar sensaciones de seguridad sin sustento real, al hacer creer que así se resuelve el riesgo. El exceso de alarmas de temblores de intensidad no destructiva y las "falsas alarmas", hacen perder credibilidad y deterioran la respuesta ante eventos destructivos. Estos dispositivos, bajo tales circunstancias, son lujos cuya base tecnológica, científica y financiera no deben competir con prioridades más urgentes para la gestión del riesgo.

1 ARX Consultores, Costa Rica

2 Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica

3 Universidad de Costa Rica.

4 Geofortis, S.A.

5 SismoConsultores S.A.

Palabras clave: advertencia sísmica, alarma de terremoto, comunicación social del riesgo, gestión del riesgo, predicción sísmica, pronóstico de terremotos.

Abstract

Risk materializes periodically, near cities and infrastructure through destructive socioeconomic impacts hindering development in Costa Rica, located at a very active and complex tectonic region. Frequent and intense seismic activity has occurred for tens of millions of years and will not stop in the future. Risk, derived from seismicity depends on both earthquake hazard features (magnitude, hypocentral depth, rupture mechanism, strong motion, wave propagation during the events, geomechanical site conditions, local effects, topography), and the vulnerability of exposed elements (population, urban areas, economy). For this reason, compliance with earthquake-resistant design codes and territorial planning must be enforced. These measures have been successful, such as when adobe was banned as building material thus radically reducing vulnerability of houses. The question "Will a major event happen?" is futile because there is no doubt that it will. Engaging in uncertain forecasts and abusing on the frequency of delivering incomplete information to the public induce stress, uncertainty, and affect socioeconomic activity. In Costa Rica, seismic alarms will not give reaction time more than 10 seconds for shallow focus local earthquakes, and 10 to a maximum of 30 seconds for major subduction events. Alarms might create feelings of security without robust basis by making believe that risk has been solved, and paradoxically increasing vulnerability. An excess of alarms of non-destructive tremors, and "false alarms", will cause a loss of credibility and deteriorate response to actual destructive events. Seismic forecasts and alarms, under such circumstances, are luxuries whose technological, scientific, and financial basis should not compete against more urgent priorities for risk management.

Keywords: earthquake alarms, seismic early warning, earthquake forecasting, seismic prediction, disaster risk management, social communication of risk.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

Durante los últimos años se ha observado una cantidad abundante de publicaciones en periódicos, revistas científicas, prensa y redes sociales sobre temas relacionados con "anticipaciones", pronósticos, predicciones, prognosis y otros términos y denominaciones asociadas con el intento de discernir, por adelantado, la materialización de eventos naturales de índole geológica (sismicidad, volcanismo, geodinámica externa). Se reconoce la intención legítima de aportar herramientas para la gestión del riesgo en varias de sus etapas y procesos, sobre todo en lo que concierne a los eventos amenazantes; es decir, aquellos capaces de generar daños y pérdidas a través de sus efectos, impactos y consecuencias colaterales. Sin embargo, la claridad y transparencia de los niveles de incertidumbre de las estimaciones y cálculos no siempre son claros ni accesibles, por lo que su funcionalidad, utilidad y confiabilidad no generan las expectativas y resultados adecuados para su aplicación (Nishenko, 1989, 1991; Yao et al., 2017; Jiang et al., 2017; Voss et al., 2018; Hobbs et al., 2019; Carvajal et al., 2019). Cualquiera de los sistemas de gestión, aparte de intentar proteger la calidad de la vida humana y sus haberes, debe fundamentarse en los criterios para restablecer la cotidianidad lo más rápidamente posible, así como la funcionalidad de los medios de subsistencia de la sociedad. La idea es orientar, de la manera más eficiente y eficaz, las acciones preventivas y la gestión de las emergencias y desastres. Para ello, la sociedad debe contar con mecanismos, factores y procesos para la observación, vigilancia, advertencia, alarma, respuesta y continuidad operativa del tejido socioeconómico. Su pilar fundamental e inequívoco debe ser la comunicación social del riesgo, cimentada en la credibilidad y confiabilidad de la forma cómo son trans-

mitidos los datos e informaciones que permiten anticipar y enfrentar el desencadenamiento de las situaciones de crisis.

Aunque la documentación e información acerca de estas situaciones se concentran casi exclusivamente en sus éxitos, también sabemos que quizás la mayoría de los ejercicios de "anticipación" ha tenido resultados relativamente negativos, o a lo sumo inconcluyentes (Protti et al., 1991; Protti et al., 2014; Schwartz et al., 2014; Dixon et al., 2014; Malservisi et al., 2015; Protti et al., 2016). Las enseñanzas son difusas y muy escasamente se ha conseguido aprender las lecciones. En este artículo se ofrecen reflexiones y proponen opciones, aplicables a los sistemas de "alarma", "alerta" y pronóstico de terremotos, fundamentadas en las experiencias recientes en Costa Rica.

Aspectos lingüísticos, etimológicos y conceptuales

Aunque es de reconocer el carácter dinámico y evolutivo del lenguaje, sobre todo en el de orden científico y técnico, es necesario establecer pautas adecuadas para el imperio de la claridad, particularmente en la comunicación social del riesgo. Deben evitarse las ambigüedades y confusiones terminológicas pues existe el peligro constante de las contradicciones, confusiones e interpretaciones incorrectas. Igualmente, es trascendental mantener la rigurosidad semántica, lingüística y epistemológica al aplicar la terminología, la señalética en los procesos de comunicación social y sobre todo en los protocolos, consignas y procedimientos asociados con la gestión del riesgo.

Bajo estas premisas, en este artículo se han tomado en cuenta, con prioridad, las definiciones primarias especificadas en el diccionario de la Real Academia Española (2023). Según se ha considerado oportuno, estas definiciones se han

complementado mediante diccionarios y glosarios alternos en lengua inglesa, como por ejemplo el *Word Reference*, *Cambridge Dictionary*, *Merriam Webster Dictionary*, *United Nations Disaster Risk Reduction (i.e. Glossary of Health Emergency and Disaster Risk Management Terminology)*, *Sendai Framework Terminology on Disaster Risk Reduction*, *UNESCO Glossary of Basic Terminology on Disaster Risk Reduction*, *IDRM Glossary of Disaster Risk Management Terminology*, y *UNDRR Disaster Risk Reduction Terminology*, cuyas referencias y enlaces de acceso respectivos se indican en las Referencias Bibliográficas. Las definiciones más precisas y útiles, relacionadas con las amenazas, vulnerabilidad y riesgo se fundamentan en Mora (2021), Cardona et al. (2023a y 2023b). De manera complementaria, también pueden consultarse las definiciones de GEM (s.f.) aunque estas son más generales y menos específicas para el análisis de los casos que conciernen este artículo. Sin duda hay mucho para debatir, sobre todo en cuanto a la claridad necesaria en el uso de la terminología y su respaldo semántico, semiótico y epistemológico. Por ello se han escogido y adaptado las acepciones más cercanas a nuestro quehacer y contexto cultural y lingüístico y se han evadido o modificado algunos términos que, aunque utilizados frecuentemente en la literatura técnica, no siempre se apegan a la rigurosidad de su significado ni a las convenciones técnico-científicas (Mora, 2021).

Terminología

En adelante, se ofrece una selección sintética con los términos y definiciones básicas adoptadas y según las fuentes diversas mencionadas anteriormente, fundamentales para el sustento de los elementos y conceptos que serán desarrollados en este artículo.

Alarma: se trata de un dispositivo o procedimiento que emite un aviso o señal para advertir sobre un suceso peligroso inminente, o que ha sucedido recientemente. El protocolo, por medio del cual funciona, tiene la función de avisar cuándo sobreviene un peligro; es decir, una situación potencialmente dañina. La alarma también puede ser definida como un “estado”, pero en general, se entiende como un sistema por medio del cual se manifiesta la materialización de una situación destructiva. Su activación permite que los organismos oficiales y la población reaccionen lo más rápidamente posible para enfrentar la emergencia y así poner en marcha los protocolos preestablecidos para reducir y, si es posible, eliminar los daños a las personas. El tipo y nivel de la alarma dependen de: i) grado de conocimiento de la naturaleza de la situación amenazante, ii) origen y celeridad de la materialización de la amenaza; iii) extensión territorial de su influencia; iv) intensidad previsible; v) potencialidad de generación de daños.

Anticipación: acción y efecto de anticipar o anticiparse. Hacer que algo tenga lugar antes del tiempo señalado, previsible o previamente a otra cosa. Anunciar algo antes de un momento dado, o antes del tiempo oportuno o esperable. Adivinar lo que ha de suceder, antes del tiempo. Tómese en

cuenta que los sucesos amenazantes, que se materializan súbitamente o si no hay suficiente información, datos y vigilancia, no permiten ser anticipados.

Alerta: se trata de un estado cuasi-permanente de vigilancia que permite percibir e identificar situaciones y circunstancias potenciales que pudiesen evolucionar hacia peligros capaces de generar daños. La alerta siempre está activa y no debe confundirse con una etapa ni una fase, aunque puede desembocar en un anuncio (advertencia) y un dispositivo (alarma) que se emitirían con el objetivo de informar a la población y tomadores de decisiones acerca de la necesidad de actuar ante un acontecimiento nocivo, previsible y significativo, para la seguridad. Por el momento no es posible visualizar, de antemano, la materialización de algunas de las amenazas naturales (e.g., terremotos, algunos tipos de volcanismo e inestabilidad de laderas), aunque se hayan alcanzado avances significativos en las amenazas hidrometeorológicas y los tsunamis. La condición es disponer de dispositivos de observación, vigilancia y comunicación social, así como la cadena de información técnica que permita percibir y cuantificar la amenaza, en el espacio y tiempo, orientar los códigos de construcción, el proceso de toma de decisiones técnicas, políticas y de comando, informar a la población, agilizar los recursos y responder ante las emergencias y desastres.

Alerta “temprana”: este término proviene de la traducción, incorrecta, del inglés “*early warning*” y debería eliminarse o modificarse, aunque se haya difundido y aparezca en la terminología oficial de procesos y hasta en el nombre de instituciones. Tómese en cuenta que las acepciones del adjetivo “*early*” aplicadas en este contexto, deberían traducirse como “anticipada” o “precoz”. Más aún, “*warning*” debería traducirse como “advertencia”, no como “alerta”. Algunos aspectos prácticos y conceptuales se encuentran descritos en la literatura disponible, como por ejemplo en Carranza (2017) y UNDRR (2023). Adicionalmente, el concepto aplicado para la “alerta temprana”, hasta la fecha, se ha limitado a indicar y prepararse para la materialización inminente de una amenaza, con muchas limitaciones en cuanto a la aplicación del resto de los preceptos, instrumentos y procedimientos de la gestión del riesgo. A veces las señales llegan al público mediante información confusa (Mena, 2023; Laporte et al., 2023), tardía (ex-post) y acompañadas de información incompleta (Alvarado, 2023), incomprensible y obsoleta (Figuras 4, 5 y 6). Por ello, sus resultados han sido, hasta la fecha, debatibles, ineficientes y hasta inadecuados. Por todo ello, deberá superarse este paradigma equívoco y confuso al cual se aferran, inexplicablemente, algunas plataformas oficiales nacionales e internacionales. Conviene revisar la documentación y experiencias (no siempre exitosas ni transparentes) relatadas en la abundante literatura sobre el tema, como por ejemplo en los textos referidos a UNDRR Inclusive early warning early action: *Checklist and implementation guide* y UNDRR *Early warning systems and early action in fragile, conflict, and violent contexts: Addressing growing climate & disaster risk* (Ver las referencias y enlaces en las Referencias Bibliográficas).

Predicción: acción y efecto de anunciar por revelación, ciencia o conjetura, y mediante una declaración precisa, algo que sucederá bajo condiciones determinadas en el tiempo, espacio y magnitud. Es la acción de manifestar aquello que es probable que suceda en el futuro, según análisis y consideraciones de juicio. Debe tomarse en cuenta que cuando los procesos naturales son súbitos, o no se cuenta con datos previos suficientes para realizar cálculos probabilísticos robustos, los eventos no pueden ser predichos. Para el caso que nos ocupa, según el *National Earthquake Prediction Evaluation Council* de los Estados Unidos (NEPEC; ver enlace en la Bibliografía), una “predicción sísmológica” será considerada seria, responsable y científicamente respaldada si cumple, con exactitud la determinación de: i) tiempo: fecha, hora; ii) localización: coordenadas del epicentro, profundidad focal; iii) magnitud, intensidad, mecanismo focal; iv) grado de confianza: cuantificación probabilística de la incertidumbre y error estándar de los cálculos; v) consideración de la probabilidad de que el evento suceda, más bien, como producto de un proceso casual, aleatorio y desconocido y sin relación con la predicción; vi) publicación *ex-ante* y *ex-post* de la predicción: tanto el éxito como el fracaso de los cálculos deben tener el mismo grado de visibilidad; vii) refrendo de la repetitividad de los aciertos y/o fracasos del modelo empleado; viii) revisión, por pares independientes y anónimos, de los datos, información, cálculos y resultados. Debe prevalecer, con la mayor importancia y rigurosidad, la prioridad de evitar la pseudociencia (i.e., profecía, adivinación, clarividencia, mentalismo, magia, creencias, sofismas y ficción), referida a las predicciones sin fundamento científico, sin racionalidad o bajo premisas equivocadas, frecuentemente utilizadas para manipular la opinión pública y obtener beneficios oscuros. Bunge (2014) llama la atención de que los científicos y filósofos tienden a subestimar a la pseudociencia y la toman como algo inofensivo, lo cual es desafortunado pues en realidad es un virus intelectual que puede enfermar una cultura con sus sinsentidos y trastocar una sociedad en contra de la ciencia.

Prognosis: proceso del conocimiento que intenta comprender las causas y consecuencias de un suceso o evento potencialmente dañino. Aunque se fundamenta en análisis probabilísticos y determinísticos, no se orienta hacia la predicción o al pronóstico. Busca conocer el rango de las intensidades posibles del evento, para enfrentar los efectos plausibles mediante la gestión del riesgo y el ordenamiento territorial.

Pronóstico: manifestación por la que se conjetura o calcula un evento futuro. Juicio que formula el especialista con respecto a eventos futuros (causas, curso, cambios, duración), según los síntomas que lo preceden o acompañan. Se trata del conocimiento anticipado de lo que sucederá en el futuro a través de indicios mensurables. Cuando los procesos naturales se producen progresiva y gradualmente y se pueden observar, medir y modelar, es posible determinar, con aproximación, dónde, cuándo y de qué manera se mate-

rializarán; por ejemplo: la meteorología y el tiempo, las inundaciones, las trayectorias de corto plazo de los ciclones, El Niño-La Niña/ENOS, algunos tipos de erupciones volcánicas, incendios forestales y deslizamientos. La precisión del pronóstico de corto plazo depende de la calidad, confiabilidad y disponibilidad de los datos, series temporales-históricas largas, modelos estocásticos complejos y recursos informáticos profusos.

COMUNICACIÓN SOCIAL Y CRISIS

Fundamentos, variables y estructura

Una opción, para mejorar y modernizar los sistemas actuales, es la de evolucionar desde el paradigma de la reacción pura, fundamentada y promovida por la “alerta temprana” hacia un proceso articulado de transmisión multimodal de información que fortalezca la asistencia al proceso de toma de decisiones en todos sus ámbitos: desde la población hasta las jerarquías políticas locales, nacionales y empresariales. Debe imperar la garantía de que la información se emita y sea recibida de manera eficiente y adecuada, que la interpretación no sea ambigua y que conduzca hacia tomar las decisiones correctas.

Factores dinámicos y efectividad de la fuente de la información

La efectividad de la información y las consignas que se desprendan, según la situación, dependerán del cumplimiento de varios requisitos y características indispensables:

- La fuente debe ser oficial, autorizada, delegada formalmente, legítima, competente, profesional, confiable, verificable y auditable.
- Coherencia en su transcripción, con tono adecuado, consistente, accesible y certificable, para evitar confusiones y ambigüedades.
- Adaptabilidad, según la evolución de las circunstancias. Estar en posición de explicar los cambios eventuales, así sean previsibles o no.
- La resolución y los detalles espaciales deben ser los mejores o más detallados posibles, incluidos el origen, intensidad, características de la amenaza y los daños eventuales.
- La mayor precisión posible, bajo las circunstancias temporales, duración, persistencia y evolución plausible del suceso.
- Claridad y la mayor simplicidad posible, según el lenguaje y composición empleados en la formulación del mensaje.
- No debe sobreestimar, subestimar, exagerar, ni alarmar innecesariamente.

Factores condicionantes del emisor

El emisor debe garantizar que el contenido de la información producida se caracterice por su:

- Certeza, es decir, que el mensaje aporte el máximo posible de certidumbre y verosimilitud acerca de los sucesos y consignas correspondientes, pues de esto depende su confiabilidad y aceptación.
- Suficiencia, pues la información no debe tener ni más ni menos de lo necesario para ser interpretada inequívocamente.
- Especificidad, para que el mensaje oriente, de la manera más precisa posible, lo que concierne las acciones a tomar, lo que se espera de los involucrados y del tiempo disponible para actuar.
- Frecuencia, es decir, la medida del número de veces con que el mensaje debe enviarse para no afectar, por exceso o escasez, la disposición a comprenderlo, creerlo y actuar.
- Canales de transmisión, con la mayor variedad y redundancia de medios confiables, para aumentar las posibilidades de recepción por parte de la población.
- Prever la conducta esperada de la población, su reacción, respuesta, actitud, disciplina, y comportamiento en las rutas de evacuación y refugios a los cuales se dirige.
- Debe tomarse en cuenta que las personas, directa o indirectamente afectables podrían ignorar, voluntaria o involuntariamente, o no comprender, la información que debería orientar sus acciones, dada su forma de transmisión, contenido y complejidad. Esto debe conllevar a un replanteamiento recurrente de la forma y medios de difundir la información, en aras de su optimización.

Factores condicionantes del perfil del receptor

El receptor, bajo cualquiera de sus perfiles (población, público general, tomadores de decisiones políticas y empresariales, etc.), debe estar en condición de comprender, confiar en el contenido y tener claras las acciones a ejecutar; además de aprestarse a actuar según las consignas, superar obstáculos psicológicos, culturales y el temor de perder sus pertenencias. Para ello, debe:

- Adaptarse, en la medida de lo posible, a los sistemas empleados, según la naturaleza de la situación, disponibilidad de recursos y medios de comunicación disponibles.
- Aprovechar las capacidades institucionales y la participación comunitaria para mejorar el grado de preparación, entrenamiento, capacidad de reacción y reconocimiento de la vulnerabilidad.
- Según su perfil cultural y nivel educativo, debe procurar acceder, constantemente, a los medios de comunicación social que conducen la información relacionada con las situaciones del riesgo.

- Tomar en cuenta los factores sociales, unidad de la comunidad, situación económica, actitud y reacciones en condición de emergencia, estructura del liderazgo y nivel de organización.

- La visibilidad de la amenaza es fundamental, por lo que es indispensable reforzar su acceso a la información, según las circunstancias y capacidades de percepción previsible.

INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO “SÍVIGILA”

Fundamentos

Dado que es imposible visualizar, de antemano e inequívocamente, la materialización de un terremoto, a diferencia de las amenazas hidrometeorológicas y algunas otras amenazas naturales, se necesita, de antemano, una cadena de información que perciba y cuantifique el peligro, en el espacio y tiempo. De esta manera será posible, además, orientar los códigos de construcción, ordenamiento territorial, el proceso de toma de decisiones técnicas, políticas y de comando, informar a la población y agilizar los recursos requeridos para responder ante las emergencias y desastres.

La estructura propuesta deberá conducir al establecimiento de un proceso integrado y multifuncional de observación, vigilancia, advertencia, alarma, reacción y respuesta al que se le denominará “SÍVIGILA”. El proceso debe incorporar estos elementos, fundamentales, para orientar y gestionar la acción de manera ágil e intercomunicada. Tómese en cuenta que, para cada amenaza, se deben desarrollar los modelos específicos propios y garantizar su funcionamiento eficiente y confiable. Las condiciones del estado del conocimiento, para establecer un sistema de este género y su relación con la gestión del riesgo, derivado de las amenazas naturales, son complejas y variables. La definición y contenido de cada componente se sintetiza en la Tabla 1. La intención es que todos los elementos estén ligados entre sí, retroalimentados recíprocamente dentro de una cadena operativa multifuncional y ágil, y cuyos vectores de enlace tengan dirección doble:

**Observación ↔ Vigilancia ↔ Advertencia ↔ Alarma
↔ Reacción ↔ Respuesta**

El nomograma de la Figura 1 relaciona el estado del conocimiento relativo, es decir, el inverso de su incertidumbre, celeridad de materialización del proceso, plazo y holgura para la acción luego de percibidos los signos premonitores, la vulnerabilidad, y el nivel de la intensidad del impacto posible. Estos factores definen el nivel del riesgo prevalente. Con excepción de las amenazas hidrometeorológicas y volcánicas, en su estado ideal del conocimiento e instrumentación, muchas otras apenas se encuentran en los márgenes del mínimo necesario de su estado del conocimiento y les falta todavía mucho camino por recorrer para aplicar adecuadamente los modelos predictivos. El uso de la inteligencia artificial (IA) es promisorio para el futuro, pero aún está

Tabla 1. Factores básicos para optimizar la observación, vigilancia, advertencia, alarma, respuesta, continuidad operativa y recuperación ante la materialización de las amenazas naturales. El código de colores representa la escala semafórica clásica de los sistemas de alarma

| Factores: observación, vigilancia, advertencia, alarma, respuesta, continuidad y recuperación; amenazas naturales | | SÍVIGILA: Alerta, permanente... | | | | | | |
|---|---|--|---|--|---|--|--|---|
| | | Observación: análisis de la evolución (alerta) | Vigilancia: probabilidad de evolución dañina | Advertencia: inminencia de un evento dañino | Alarma: evento dañino en curso, materializado | Reacción, respuesta: acción | Continuidad: operativa y funcional | Recuperación: retorno a la normalidad |
| Gestación rápida a mediana, a veces previsible y visible | Inundaciones súbitas o progresivas | Etapa prospectiva: determinación y pronóstico de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo; modelos, escenarios, simulaciones, simulacros, etc. Con apoyo del ordenamiento territorial, gestión integral del riesgo, gestión ambiental, institucionalidad, legislación, reglamentaciones y códigos. | Variabilidad y estacionalidad hidrometeorológica | Amenazas hidrometeorológicas; situación de las cuencas | Hidrología, hidráulica, avenida, desbordamiento, inundación | Reacción y movilización de los recursos humanos, financieros, materiales y técnicos requeridos Activación de los protocolos de acción Evaluación del riesgo materializado, identificación y movilización de los recursos financieros y técnicos. Cuantificación de los pasivos contingentes y del riesgo residual | Activación de los procedimientos y acciones para guiar y realizar la reanudación y restauración de la calidad de vida y del proceso de desarrollo sostenible | La condición de alerta se mantiene; los procesos de observación y vigilancia continúan y mejoran con base en la documentación y lecciones aprendidas. Identificar y conocer las lecciones no aprendidas, o no entendidas. No reproducir los factores previos de la vulnerabilidad |
| | Inestabilidad de laderas: deslizamientos súbitos y lentos; tamaño variable | | Evolución de la resistencia al corte, deformación, fracturación, agua subterránea | Aceleración, deformación del terreno; sismicidad, lluvias intensas, actividad antropogénica | Deslizamientos, aludes torrenciales, caída de bloques rocosos, erosión intensa | | | |
| Gestación frecuente, invisible; materialización lenta o súbita | Sismicidad: Vibraciones, licuefacción, tsunamis, deslizamientos, ruptura superficial, levantamiento continental | | Evolución de la deformación cortical, silencio sísmico; registros sismográficos y aceleraciones | Solamente mediante determinación probabilística no-predictiva de la amenaza sísmica; posibles modelos con IA | Terremotos y efectos asociados (vibración intensa, licuefacción, tsunamis, deslizamientos) | | | |
| | Meteorología: Frentes fríos; sistema tropical (ondas, depresiones, tormentas, huracanes) | | Tiempo, sinóptica atmosférica y oceánica | Gestación, evolución sinóptica, trayectoria e intensidades observadas y previsible | Influencia directa e indirecta: vientos, lluvias, marejadas | | | |
| Gestación de corto y mediano plazo, observable | Sequías | | Variabilidad climática: El Niño/La Niña-ENOS, ZCIT. | Estación seca extendida; déficit-estrés hídrico severo por más de tres meses | Sequías: meteorológica, agronómica hidrológica, estructural | | | |
| | Volcanismo: Erupciones, lahares; emisión de gases y formación de lluvia ácida, lava y piroclastos | | Sismicidad, microsismicidad, cambio de temperatura, desgasificación; deformación cortical | Con evidencias precursoras e indicadores robustos, correctamente interpretados | Erupciones explosivas, emisión de piroclastos de caída o flujo, coladas de lava, domos, lluvia ácida, lahares, etc. | | | |
| | Impacto de asteroides | | Observación astronómica, trayectoria, aproximación, tiempo | Cálculos para interferencia de la trayectoria, recursos disponibles para evitar-reducir impacto | Impacto local a global | | | |
| Gestación lenta (mediano a largo plazo) | Efectos del calentamiento global antropogénico sobre la variabilidad climática | | Variación y evolución del contenido atmosférico de gases, vapores y partículas; efecto invernadero; temperaturas en océanos y atmósfera | Reducción de glaciares; ascenso del nivel del mar y de las temperaturas; variación del régimen pluviométrico; cambios en microclimas | Impacto local a global de las variables climáticas de muy largo plazo | | | |
| Gestación lenta (muy largo plazo) | Cambio climático | | | Glaciares-interglaciares (fríos-calientes); escala geológica del tiempo | | | | |

en un desarrollo gestacional prematuro (Saad et al 2023; Thorsberg, 2024).

La celeridad de materialización de la amenaza y su in-

tensidad, es decir, el plazo-holgura para la reacción también es determinante, al igual que el estado del conocimiento (i.e. inverso de la incertidumbre) y el nivel del riesgo prevalente. Son condicionantes para definir los plazos de reacción ante

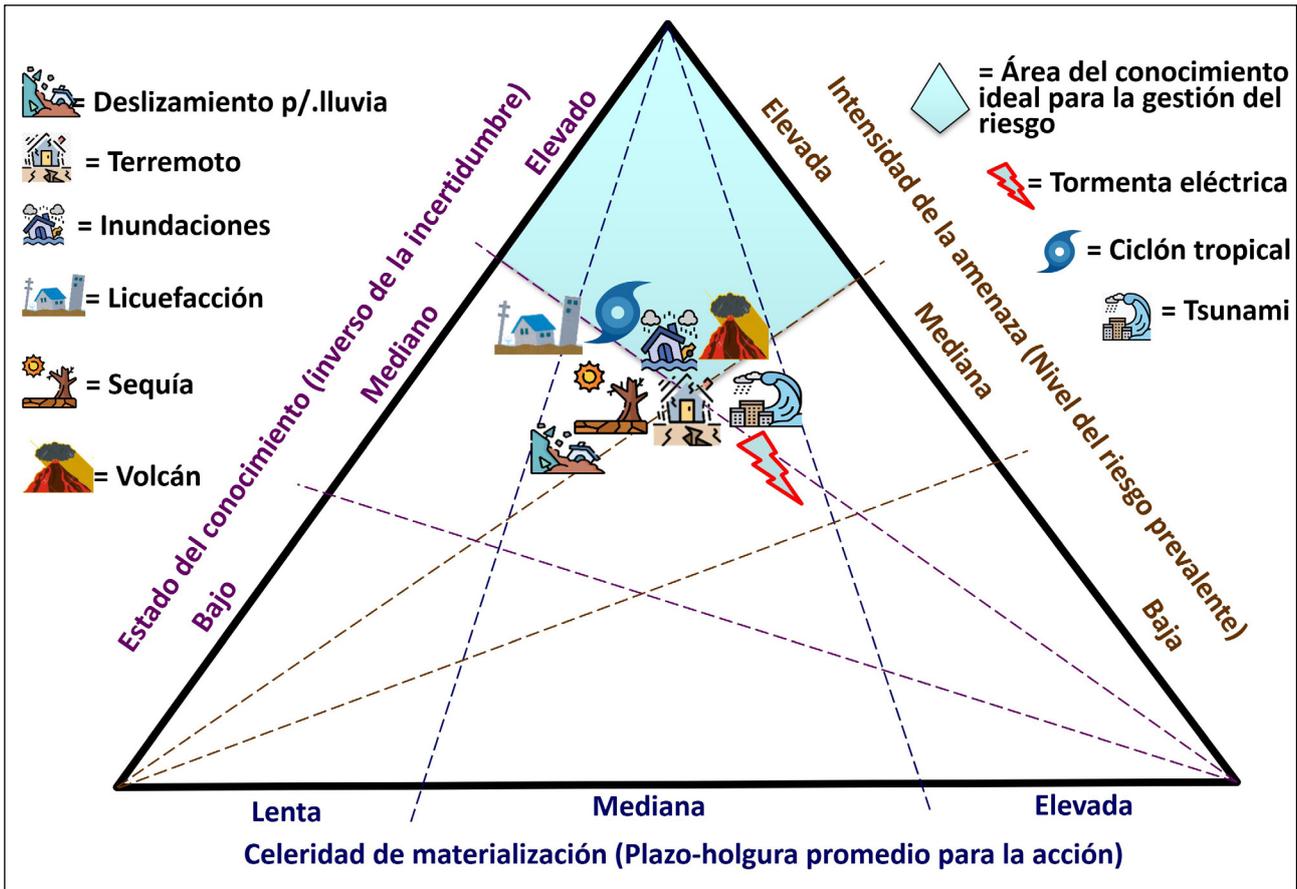


Figura 1. Estado del conocimiento, prognosis y condición relativa para considerar, al diseñar un sistema de observación, vigilancia, advertencia, alarma y respuesta (SÍVIGILA) de amenazas naturales. Elaboración propia.

las emergencias, según las etapas de materialización de las amenazas y su aplicación en la gestión de los modelos SÍVIGILA. Al combinarse, estos elementos permiten ubicar en dónde se encuentran el estado del conocimiento y los procedimientos de gestión que deben ser reforzados.

Al igual que en la Figura 1, en la Figura 2 se puede establecer un procedimiento referencial y relativo que permite ubicar cada caso en particular. Este procedimiento puede, también, ser aplicado y adaptado, eventualmente, a las amenazas antropogénicas. Los procedimientos funcionan mediante la integración de datos e información derivados de la observación (pasiva, alerta permanente) y vigilancia (activa, cuantificación) cuando se presenta el caso de prever o percibir la evolución de una situación que pudiese conducir hacia la generación de daños (advertencia, amenaza).

En el caso que se alcance y supere el umbral de la intensidad y, por lo tanto, se pudiesen producir daños, se emitirá una alarma, la cual desencadenaría los protocolos de reacción para los casos y estados de emergencia, lo cual permitiría convocar a quienes los manejarían (e.g. COE: centros de operación de emergencias) (Figura 3). Si efectivamente se producen daños, es decir que el riesgo se manifiesta, deberán cuantificarse los efectos e impactos para guiar el proceso de asignación de prioridades para la respuesta y recuperación. La situación, si ha alcanzado el nivel de "desastre", re-

querirá establecer y ejecutar las acciones requeridas para el proceso de reconstrucción, continuidad operativa del tejido socioeconómico y cultural, cuantificación de los recursos necesarios para atenderlo y la movilización de los instrumentos financieros de retención y transferencia, requeridos y disponibles (Figura 3).

Base tecnológica para los SÍVIGILA

No hay duda de que conviene utilizar y aprovechar la tecnología más avanzada disponible para apoyar los sistemas SÍVIGILA, sobre todo desde los puntos de vista de la informática, transmisión satelital de datos, recepción y gestión de datos georreferenciados, algoritmos de pronóstico, visualización, emisión de información, análisis, interpretación, redes neuronales, inteligencia artificial, etc. (Saad et al., 2023; Thorsberg, 2024). Sin embargo, no es indispensable un grado inmenso de fineza instrumental, muchas veces bajo costos financieros y necesidades de recursos humanos de un nivel muy elevado. La adquisición de estos sistemas avanzados es, muchas veces, impulsada por modas y presiones del mercado. La eficacia, eficiencia y efectividad de los sistemas dependen de programas sólidos que garanticen su sostenibilidad, mantenimiento, logística, recurso humano, costos, ciencia e institucionalidad.

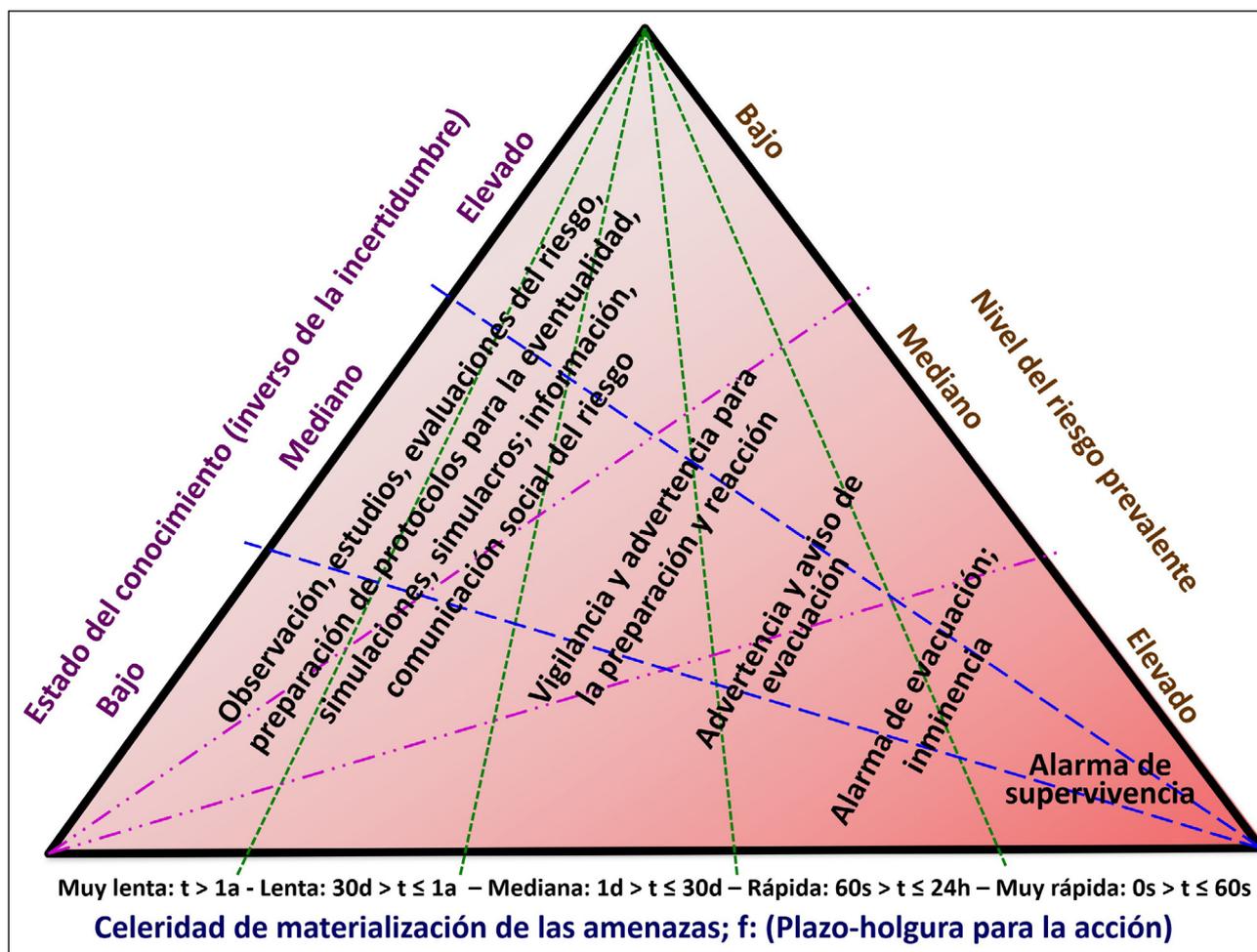


Figura 2. Variables para el diseño de los sistemas de observación, advertencia, alarma y respuesta (SÍVIGILA) ante las emergencias causadas por las amenazas naturales. La categorización de sus estados del conocimiento, nivel del riesgo prevalente y celeridad de materialización son referenciales y relativas. t=tiempo, a=año, d=día, h=hora, s=segundo. Elaboración propia

Paradójicamente, la alta tecnología también puede generar el efecto perverso de espejismos inconvenientes, pues los equipos impresionantes, computadores, satélites, visualizaciones coloridas, etc. envían mensajes incompletos que pueden interpretarse como la solución de todos los problemas. Además, podrían desembocar en sofismas, sensaciones de seguridad que no tienen sustento real y, por consiguiente, podría aumentar la vulnerabilidad, pues distraen la atención sobre las prioridades y generan la pérdida de interés por las verdaderas soluciones de las causas del riesgo. Por ello, es conveniente evitar los sistemas excesivamente complejos y caros, y mantener claro el hecho de que la confiabilidad de la estructura no siempre depende de su complejidad y costo.

y lugar, por lo que las anticipaciones, predicciones y pronósticos, de todas maneras, imprecisos e inciertos, promueven el efecto perverso de distraer la atención sobre la evaluación proactiva de la amenaza, la aplicación de los códigos sismo-resistentes, el ordenamiento territorial y las prácticas constructivas adecuadas. Entonces, bajo el estado actual del conocimiento y de la ciencia, la predicción sismológica, aparte de imposible, es cara e innecesaria y genera más problemas que soluciones. Ya lo expresó, con toda propiedad, el padre de la sismología moderna Charles F. Richter: "...only fools and charlatans predict earthquakes..." (1977; en Houg 2007, p. 253). Por lo tanto, es preferible que un país en vías de desarrollo, con recursos limitados, establezca sus prioridades en función de sus recursos disponibles y sus prioridades reales.

¿PREDECIR O NO PREDECIR?

¿Es justificable intentar predecir, pronosticar o anticipar sismos?

En Costa Rica los sismos de magnitud mediana a grande son frecuentes y pueden suceder en casi cualquier momento

Intentos predictivos (pronóstico, anticipación) de terremotos y su comunicación social

Si bien los pronósticos sísmicos siguen siendo controversiales en todo el mundo, lo son aún más para casos como el de Costa Rica, con observaciones históricas documentadas

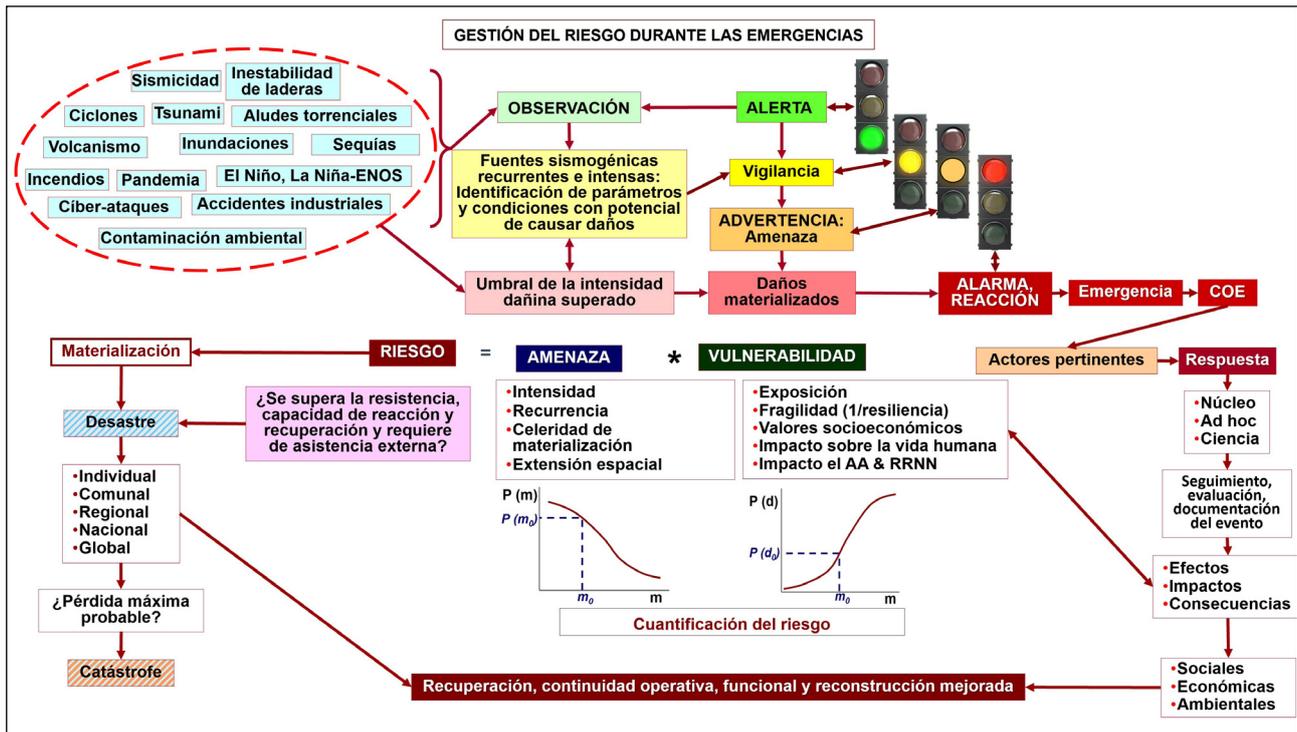


Figura 3. Proceso que permite desplegar la secuencia de la observación, vigilancia, advertencia y alarma, en el caso de que la amenaza sísmica sea capaz de generar daños sociales y económicos. COE: Centro de Operaciones de Emergencia, AA: Ambiente, RRNN: Recursos Naturales, $P(m)$: Probabilidad anual de excedencia de la amenaza; m : distribución del nivel de intensidad de la amenaza; $P(d)$: Probabilidad de excedencia de los daños, según la distribución probabilística de la intensidad de la amenaza. Elaboración propia.

de no más de cuatro siglos e instrumentales de apenas cincuenta años, por lo que los cálculos poseen niveles de incertidumbre muy elevados. En Costa Rica se han realizado investigaciones, en este campo, desde mediados del decenio de 1980 y, sobre todo, a partir de 1990. Los análisis se han fundamentado en observaciones instrumentales, recuentos históricos, mediciones geodésicas de las deformaciones corticales mediante GPS, imágenes satelitales, cálculos probabilísticos, etc.

El primer caso estudiado fue el de un sismo probable en la región de la península de Nicoya, el cual, según lo predicho, habría de producirse entre 1989 y 1991. El período de recurrencia, en esa fuente sísmogénica, calculado de manera simplista y con base en registros históricos e instrumentales disponibles, era de $T_r \approx 40$ años (Nishenko 1989, 1991; Protti et al., 1991), el cual es un dato que ya se conocía desde 1986 (Montero, 1986). El evento anterior había sucedido en 1950.

Dado que el sismo “previsto” no se presentó en la fecha originalmente calculada (Nishenko 1989, 1991), el pronóstico fue renovado repetidamente entre 1997 y 2010, indicando que sucedería entre tres y nueve años después de cada anuncio (Alvarado, 2023). Irónicamente, a lo largo de esos años hubo sismos de mediana a elevada magnitud y enjambres importantes en muchas partes del territorio nacional excepto, precisamente, en la península de Nicoya. Habría que esperar hasta setiembre de 2012 para que, fi-

nalmente se produjera 23 años después (Alvarado, 2023). Durante ese período, el pronóstico repetitivo, reproducido insistentemente por los medios de comunicación (Figura 4), trajo consecuencias importantes para la economía local: desaceleración de inversiones y turismo, depreciación de terrenos, reducción de la mano de obra dedicada a la pesca por temor a un posible tsunami, y sicosis presísmica intensa (Alvarado, 2023). Los detalles de los parámetros, variables y elementos aplicados para el estudio retrospectivo (“ex-post”) del sismo, pueden ser consultados en la extensa literatura publicada (Feng et al., 2012; Jiang et al., 2012; Lay et al., 2013; Dixon et al., 2013; Walter et al., 2013; Protti et al., 2014; Schwartz et al., 2014; Dixon et al., 2014; Malservisi et al., 2015; Walter, et al., 2015; Protti et al., 2016; Yao et al., 2017; Jiang et al., 2017; Voss et al., 2017; Voss et al., 2018; Hobbs et al., 2019; Carvajal et al., 2019 y Xie et al., 2020).

A partir de la revisión de esta literatura se aprecia que el análisis se fundamentó en la interpretación de secuencias, períodos “silenciosos” (“brecha sísmica”), análisis probabilísticos y otros elementos y procesos adicionales. Hasta la fecha, sin embargo, no han quedado claros los modelos reológicos, ni las relaciones esfuerzo-deformación y ruptura aplicados, por lo que sigue abierto el debate, en particular porque no se dispone de evidencias claras y contundentes acerca del éxito de esa “anticipación”, más allá de todas las dudas razonables (Saegusa, 1999; Uyeda, 2013; Muñoz, 2023; Laporte et al., 2023; Thorsberg, 2024).



Figura 4. Selección de recortes periodísticos publicados entre 1989 y 2012, relacionados con la supuesta "anticipación" del sismo de Nicoya de 2012. Elaboración propia.

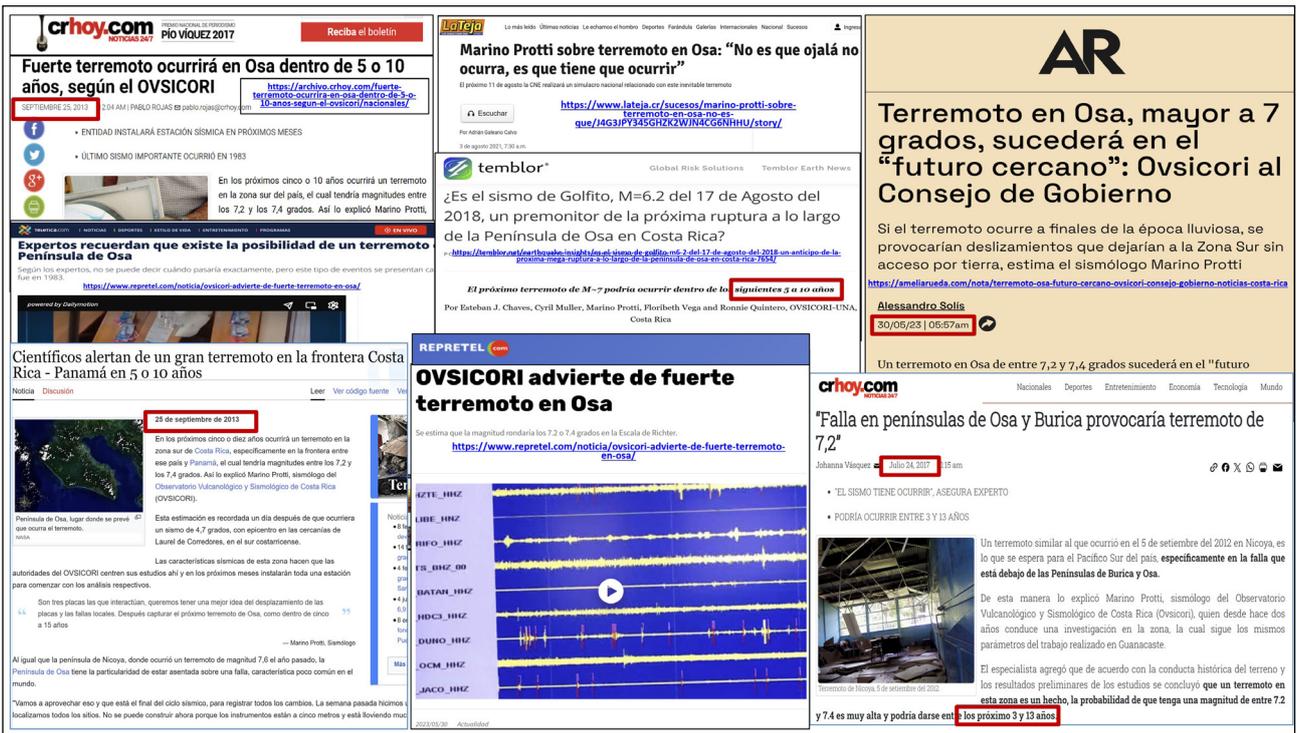


Figura 5. Selección de recortes periodísticos, publicados entre 2020 y 2023, relacionados con la "anticipación" (pronóstico, predicción) de un posible sismo futuro en la península de Osa, Costa Rica. Elaboración propia.

Actualmente se realiza un nuevo ejercicio predictivo, aplicado a la región sur de Costa Rica (península de Osa, golfo Dulce). El plazo estimado para el evento ya había sido situado entre 2018 y 2023 (Voss et al., 2018; Hobbs et al., 2019; Carvajal et al., 2019; Xie et al., 2020), pero aún no

ha sucedido. Los autores denominan estos ejercicios como "anticipaciones", pero no está claro en cuál de las categorías pueden clasificarse, según lo recomendado por NEPEC. Como ya fue sobrepasada la ventana temporal original, resta por ver cuándo y cómo será actualizada su revisión. Una

Tabla 2. Mitos y realidades asociados con predicciones, pronósticos y anticipaciones sismológicas.

| Mito | Realidad |
|--|--|
| La sucesión (enjambre) de numerosos sismos con magnitud baja evita la acumulación y libera progresivamente la energía sismogénica; por ello el próximo evento será menos intenso | La afirmación no tiene fundamento científico demostrable, en tanto que las escalas de magnitud son logarítmicas: Para liberar la energía de un terremoto, por ejemplo, Mw 6,3, se requiere aproximadamente de, al menos, 33 sismos Mw 5,3 o 1000 de Mw 4,3 |
| La microsismicidad y los enjambres se consideran síntomas precursoros de un evento sísmico mayor y próximo. | Ha sucedido en algunos casos documentados, pero el criterio está lejos de ser ley natural. En muchas regiones del mundo sucede, más bien, que los enjambres terminan sin producirse un terremoto mayor y muchos sismos importantes suceden sin un enjambre previo |
| La tasa de emisión del gas radón, en el terreno, se correlaciona con un sismo importante próximo | Ha sucedido en algunos casos, pero el tema es controversial; no hay regla única al respecto. Suceden terremotos sin emisión significativa previa de radón y también, hay emisiones previas significativas de radón sin terremoto. Este tema sigue en investigación, sin conclusiones definitivas |
| Variación del comportamiento de los animales, clima, campo electromagnético, corrientes telúricas, brecha sísmica, dilatancia, etc. | No hay evidencia científica ni pruebas contundentes que respalden su validez como predictores; las situaciones precedentes han sido ambiguas, contradictorias y sin explicación satisfactoria, más allá de pocos aciertos dudosos y/o coincidencias. Ciertamente, debe investigarse más al respecto, con tecnologías mejoradas, pero los resultados hasta la fecha aún son ambiguos |
| La observación, medición e interpretación de la acumulación de la deformación en la corteza terrestre, con GPS satelital y/o geodesia, interferometría de radar o láser u otras metodologías, permite predecir o "anticipar" sismos. | Permite correlaciones empíricas entre el estado de los esfuerzos, deformaciones corticales y la posible liberación cinética durante la ruptura. Por ahora solo debe tomarse como señal precursora accesoria, complementaria y más bien "forense", pues no ha permitido predecir, por sí sola, exactamente dónde, cuándo y la magnitud del sismo. No hay éxitos repetidos en una misma fuente sismogénica, aunque abundan pruebas "ex-post" (retrospectivas). Las mejores evidencias precursoras de los sismos importantes han sido geodésicas, complementadas con datos de estaciones sismográficas de banda ancha que registran eventos de tipos no percibidos, hasta ahora, por estaciones tradicionales. Todavía no hay correlaciones directas y contundentes, solo deducciones "a posteriori", frecuentemente apoyadas con tecnología InSAR (interferometría radar, láser) que compara imágenes pre y post-eventos que a veces se presentan al público como éxitos predictivos |

muestra de la producción repetitiva de la noticia, aparecida en diarios y redes sociales, se ofrece en la Figura 5.

Relevancia y efectividad de las "anticipaciones" (i.e. predicciones, pronósticos)

Aunque no se descarta la posibilidad de que en el futuro la predicción sísmica confiable sea factible, en particular con ayuda de la Inteligencia Artificial (Saad et al., 2023; Thorberg, 2024) y otras herramientas modernas; es claro que el estado actual del conocimiento, los datos disponibles, la tecnología y los cálculos probabilísticos todavía no ofrecen claridad, credibilidad y contundencia acerca de sus resultados, pues las incertidumbres son muy elevadas. Vale la pena preguntarse, entonces, si es relevante anticipar, predecir o pronosticar un sismo de gran magnitud en un ambiente geotectónico tan activo como el de Costa Rica. Además, la irregularidad de la actividad recurrente de las fallas tectónicas todavía es un asunto que no logra descifrarse en su escala espaciotemporal y de sus magnitudes. Por ello, no es adecuado denominar indulgentemente, con el término "anticipación", a un ejercicio predictivo sabiendo de antemano que no será creíble, aun si luego, cuando inevitablemente suceda, reivindicarlo "ex-post" de manera "forense", o que, si de todas maneras se produce, ocultar que ha sido por mera coincidencia y se refleje como un caso exitoso, con gran estruendo publicitario.

Por todo lo anterior, no conviene caer en la trampa de los mitos relacionados con premoniciones o precursoros cuyo fundamento científico es falso o, al menos dudoso, contradictorio e incompleto (Tabla 2). Como de todas maneras los sismos medianos o mayores se producirán tarde o

temprano, parecería un esfuerzo relativamente inútil realizar una acción predictiva, con incertidumbre y costo elevados. ¿No es preferible, más bien, concentrarse en las estimaciones probabilísticas, la prognosis de la amenaza sísmica y las características de sus impactos posibles para enfrentarlos eficientemente y reducir la vulnerabilidad mediante prácticas racionales de diseño, construcción y ubicación de viviendas, obras, infraestructura y actividades económicas?

"Alertas" sísmicas: Aplicabilidad, credibilidad, eficiencia

Las "alertas" (preferiblemente, deberían llamarse "alarmas") sísmicas no son efectivas en cualquier ambiente geotectónico, psicosocial, cultural y escala geográfica. Aunque hayan sido exitosas en contextos específicos (Carranza, 2017; Allen y Melgar, 2019; Silva et al., 2023), no parecen serlo en lugares con fuentes sismogénicas cercanas. Para el caso de Costa Rica y, según los registros históricos e instrumentales disponibles, la magnitud máxima no ha superado Mw 7,7 (Limón-Telire, 1991), aunque no se descartan magnitudes superiores en el futuro (Montero, 1986; Montero et al., 1994).

Según el contexto sociocultural de Costa Rica, tomando en cuenta la geometría, distribución espacial y calidad relativamente elevada de las estructuras civiles, una alarma sísmica debe ofrecer, para reaccionar, por ejemplo, en la Gran Área Metropolitana y otros centros poblados, comerciales y turísticos, no menos de 30 a 50 segundos para los sismos de subducción. Entonces, si se toma en cuenta que la velocidad de las ondas S (Vs), en la corteza inferior a media, es de alrededor de 4 km/s y las distancias hipocentrales entre las

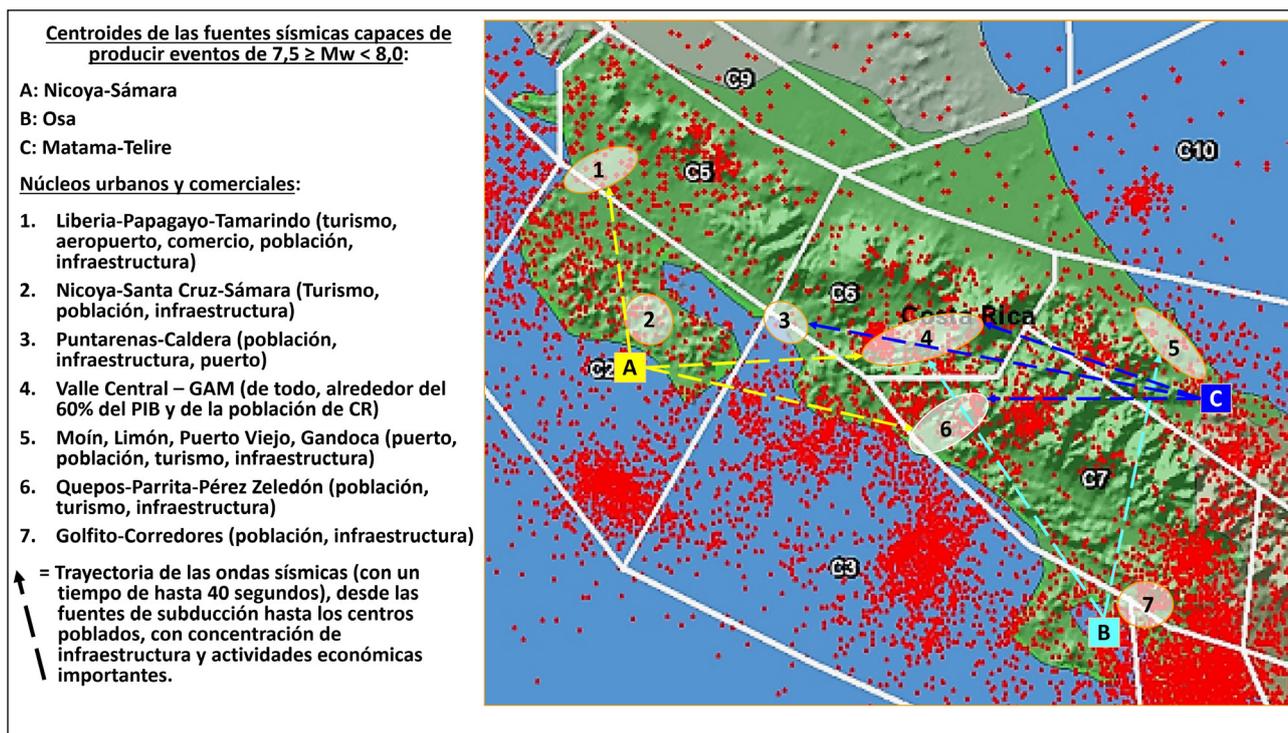


Figura 6. Trayectorias posibles, desde los centroides de las fuentes sísmogénicas corticales (subducción, $z \geq 15\text{km}$), capaces de generar los eventos de mayor magnitud e intensidad en Costa Rica ($7,5 \geq Mw < 8,0$; Climent et al., 2008) hasta los principales centros de población y actividad económica del país. Las distancias estimadas son de alrededor de 160 km. De acuerdo con los cálculos preliminares, se estima que los tiempos de arribo de las ondas S serían de alrededor de 40 segundos. El mapa de fondo fue tomado de Climent et al. (2008); la ubicación de los centroides de las fuentes, trayectorias (flechas) de los sismos eventuales y ubicación de las áreas pobladas y de actividad económica son de elaboración propia.

fuentes sísmogénicas productoras de terremotos con potencial destructivo ($Mw < 8$; Climent et al. 2008) y los principales centros poblados y de actividad socioeconómica, son de alrededor de 160 km (Figura 6), esto implica alrededor de 40 segundos para el arribo de las ondas.

Dado que el proceso de detección, cálculos automáticos preliminares, localización, determinación de la magnitud, transmisión de los datos y emisión de la alarma toman alrededor de 10 a 15 s, en el mejor de los casos restan no más de 20 a 30 segundos disponibles para la reacción de la población. Si las estructuras resistieran, este tiempo podría ser suficiente para protegerse bajo las mesas, o quizás evacuar edificios de no más de 2 a 3 pisos, siempre y cuando la población tenga acceso eficiente a la información y suficiente preparación y disciplina; esto, por el momento, no es una realidad demostrada. Tampoco es clara la funcionalidad de esos sistemas en las áreas rurales del país, a menos de que las alarmas estén adecuadamente vinculadas con el localizador y GPS del teléfono de los usuarios.

De la misma manera, puede afirmarse que los sismos generados por fallas locales, dada su cercanía hipocentral, serán percibidos entre 0 y 25 s, por lo que los sistemas son inútiles (Figura 6).

Así las cosas, los promotores de este tipo de proyectos deberán realizar un análisis probabilístico-estocástico (Allen y Melgar, 2023) que combine: ubicación hipocentral de las

fuentes sísmicas, magnitudes probables, distancias de recorrido, funciones de atenuación, y descomposición de los espectros y directividad de las ondas, respuesta de los terrenos e interacción suelo-estructura, etc. para definir, con precisión, esos tiempos disponibles y demostrar, más allá de cualquier duda razonable, que la relación beneficio/costo de las inversiones es positiva.

También, es pertinente responder la pregunta de cómo se manejarán, ética y jurídicamente, en el futuro, las falsas alarmas y predicciones no cumplidas, causadas por errores en la investigación, instrumentos y cálculos (Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica-OVSICORI, 2023; Mena, M, 2023; Figuras 7a y 7b) o por manipulaciones humanas erradas. Este tema es de capital importancia, sobre todo en el caso de haberse ocasionado consecuencias sociales, psicosociales y económicas.

En todo caso, se considera necesario indicar que la política pública, para la gestión del riesgo, debe priorizar la aplicación de los códigos de diseño, invertir en la reducción de la vulnerabilidad, asegurarse de la calidad de la construcción y el refuerzo adecuado (*City of Los Angeles*, s.f.) de las edificaciones e infraestructura, nuevas y existentes, y no concentrarse en pronósticos y alarmas, como si fuesen la mejor o única opción.

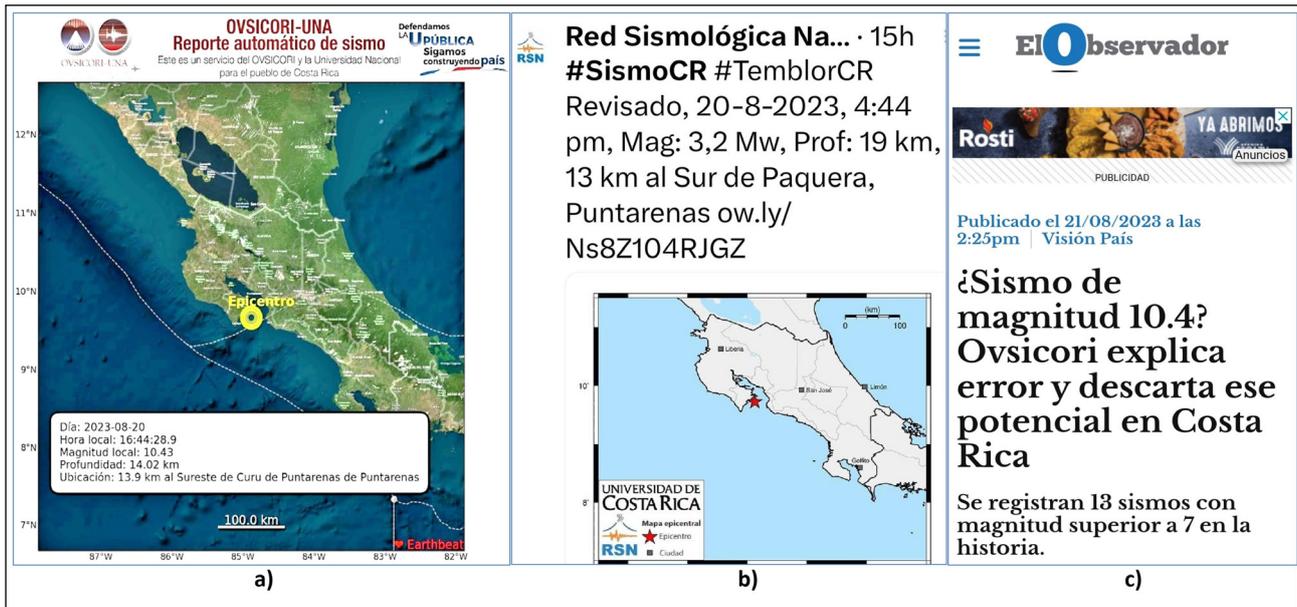


Figura 7. a) El sistema de “alerta temprana” del OVSICORI informó sobre un evento de magnitud Mw 10,43 sucedido en la entrada del Golfo de Nicoya, Costa Rica. b) La magnitud real fue de Mw 3,2 según la Red Sismológica Nacional. El OVSICORI luego informó acerca del error (OVSICORI, 2023) y c) La información corregida también fue difundida por la prensa (Mena, M, 2023). Elaboración propia.

CONCLUSIONES

La gestión del riesgo es preferible

Han sucedido terremotos recientes en Costa Rica (Moraes, 1994), y otros países latinoamericanos, que no generaron tantos daños como en los casos de Haití (Mora, 2012), Turquía, Marruecos, Nepal y otros sitios (Wikipedia, s.f.). La razón es que ya se cosechan dividendos por respetar códigos de construcción modernos y actualizados (Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos, 2011; Comité Técnico Guía Boliviana de Diseño Sísmico, 2020; Instituto Nacional de Normalización de Chile, 2019; Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcción Sismorresistente de Colombia, 2010; Dirección General de Políticas y Regulación en Construcción y Saneamiento del Perú, 2019). Junto con el ordenamiento territorial y la gestión del riesgo, son las mejores herramientas para reducir el efecto e impacto de los sismos intensos y para salvaguardar la vida humana, la infraestructura y la sostenibilidad del desarrollo. Conviene enfatizar y tomar ventaja los aspectos y avances del conocimiento de la amenaza sísmica y del riesgo (ERN-INGENIAR-CAPRA, 2015; Arroyo, 2023) a partir del hecho de que periódicamente suceden y producen efectos, impactos, daños y pérdidas considerables que desaceleran el desarrollo sostenible.

Recuérdese que Costa Rica se encuentra dentro de una de las regiones tectónicamente más activas y complejas del mundo, bajo influencia directa e indirecta de seis placas tectónicas. Tómese en cuenta que, además, aún no se terminan de comprender todos los procesos geotectónicos y sismogénicos regionales y locales. La actividad sísmica recurrente e intensa, desde hace varias decenas de millones de años en prácticamente todo el territorio nacional, no se detendrá en el futuro cercano. Considerando el tamaño y complejidad

geológica de Costa Rica, un sismo de magnitud elevada se puede producir prácticamente en cualquier momento, múltiples lugares y con capacidad para generar efectos e impactos importantes, aún a distancias considerables. Tampoco debe olvidarse que también está expuesta a una gran diversidad de otras amenazas naturales (ciclones tropicales, inundaciones, sequías, volcanismo, deslizamientos, erosión intensa de suelos) y antropogénicas (pandemias, ciberataques, accidentes mortales de tránsito, narcoviolenia, contaminación ambiental) que causan daños sociales, económicos, ambientales y culturales, y que también merecen ser prevenidos y atendidos con prioridad.

¿Son necesarias las anticipaciones” y las “alertas” sísmicas?

Como se ha discutido, en Costa Rica una alarma no daría más que algunas decenas de segundos para reaccionar ante las señales de un sismo importante proveniente de alguna de las fuentes de la subducción. Las alarmas sísmicas, así como los estudios para sustentar las “anticipaciones” (pronósticos, predicciones) son lujos cuya base tecnológica, científica y financiera no deben competir con otras prioridades mayores y más urgentes para la gestión del riesgo. La eficacia de esta última ha sido probada exitosamente en el pasado, como cuando fue prohibido el adobe, a principios del siglo XX, como material de construcción; su efecto fue la reducción radical de la vulnerabilidad de las viviendas (Orden XI. No. 492-A de 1841, Departamento de Gobernación de Costa Rica, 1841; Decreto N° 10 de 1910; Municipalidad de Cartago; Miranda, 2019).

Aunque es claro que el conocimiento disponible acerca

de las fuentes sísmicas se supera constantemente en Costa Rica, es de reconocer que todavía faltan por descifrar muchas variables. Por ello, la discusión científica debería orientarse en subsanar lo desconocido y no en ejercicios especulativos. Los temas merecen, todavía, mucha discusión abierta. Entonces, la pregunta sería: “¿Sucederá un sismo mayor?”, pues definitivamente lo habrá, casi en cualquier parte del territorio nacional. Lo importante es saber si el país está preparado para enfrentarlo y no solamente en una región específica, pues puede suceder en cualquier momento y lugar. Por ello, no vale la pena enfrascarse en las alarmas y pronósticos inciertos, ni conviene abusar de la frecuencia de entregar información incompleta a la población y a los tomadores de decisiones quienes, al carecer de formación especializada en temas geológicos y sismológicos, pueden caer en las trampas del estrés, angustia, pánico, caos, rumores, incertidumbres, y afectar las actividades socioeconómicas.

Las “anticipaciones” (*i.e.* pronósticos, predicciones) y “alertas” (*i.e.* alarmas) pueden también ser fuentes de seguridad sin sustento al hacer creer que resuelven el riesgo, por lo que más bien incrementan la vulnerabilidad. Además, las inversiones requeridas para sustentar sus bases científicas y tecnológicas compiten contra otras prioridades mayores y más urgentes para la gestión del riesgo (Mora, 2021).

RECOMENDACIONES

Acerca de los sistemas “SÍVIGILA”

Los sistemas para la observación, vigilancia, advertencia, alarma y respuesta (SÍVIGILA) son indispensables para garantizar la seguridad de la población, pero:

- Solo reducen una parte de la vulnerabilidad: las muertes y heridos.
- Otros elementos expuestos (infraestructura, producción de bienes y servicios, etc.) siguen tan vulnerables como antes.
- Deben concebirse luego de evaluar todas las amenazas y el contexto de la vulnerabilidad.
- No poseen utilidad sin sus complementos: conocimiento previo del riesgo, recursos de la comunicación social del riesgo, preparación, organización, definición de rutas de evacuación, simulaciones, simulacros, administración de refugios, educación e información a la población y tomadores de decisiones, políticas de continuidad operativa y funcional.

Gestión del riesgo, respeto de los códigos de construcción y ordenamiento territorial

Dado que el riesgo derivado de la sismicidad no solo depende de la magnitud de la amenaza, sino también de los mecanismos de ruptura, características de las sacudidas sísmicas, condiciones geomecánicas del sitio, topografía, y sobre todo de la vulnerabilidad de los elementos expues-

tos (población, áreas urbanas, economía), debe tomarse en cuenta que, hasta los sismos de magnitudes medianas, cuando suceden con epicentros cercanos y profundidades someras, también pueden ser destructivos; ejemplos de ello abundan en la historia. Por estas razones, es preferible mejorar la ubicación segura de la población, el diseño y construcción sismorresistentes, vigilar la calidad de los materiales y evitar concentrarse en el análisis de escenarios singulares, una sola fuente sísmica, exclusivamente en la magnitud del sismo posible, o solo de la respuesta ante la emergencia plausible; es necesario reforzar la integralidad de la gestión del riesgo (Sendai Framework Terminology, 2015; Mora, 2021):

- Conocer mejor los aspectos, características y pronóstico del riesgo, en función de la distribución espacial y temporal de la amenaza sísmica (fuentes, atenuación, intensidades), sus efectos derivados (inestabilidad de laderas, licuefacción de suelos, tsunamis, aceleraciones y amplificaciones del espectro de ondas) y de todos los aspectos de la vulnerabilidad de los elementos humanos y ambientales (grados de exposición y fragilidad, daños y pérdidas económicas y financieras, efectos posibles sobre la población y los recursos naturales).
- Intensificar la estrategia para la comunicación social del riesgo mediante la educación y los procesos de flujo e intercambio de información entre la ciencia, la población y los tomadores de decisiones políticas y empresariales, locales y nacionales.
- Reforzar la reducción del riesgo mediante instrumentos de prevención, adaptación y mitigación estructural (refuerzo y resiliencia de viviendas, obras de infraestructura, producción de bienes y servicios) y no estructural (códigos de construcción, cimentaciones y laderas, ordenamiento territorial, reglamentaciones, protocolos y normativas).
- Reforzar la protección financiera mediante instrumentos de retención y transferencia del riesgo.
- Fomentar el desarrollo y fortalecimiento de los sistemas y protocolos de investigación, observación, vigilancia, respuesta y continuidad operativa y funcional.
- Fomentar la preparación en las comunidades, apoyada y promovida por los niveles superiores jerárquicos municipales y del gobierno central mediante tareas planificadas y sistémicas, no como esfuerzos aislados en comunidades, grupos específicos o personas, sobre todo las que, con frecuencia, promueven rumores o información incompleta, ante la desorganización y descoordinación de quienes deben asumir las responsabilidades del caso.

Finalmente, se considera necesario reafirmar el criterio de que la política pública, para la gestión del riesgo, debe priorizar la aplicación de los códigos de diseño, invertir en la reducción de la vulnerabilidad, incentivar la calidad de la construcción y el refuerzo adecuado de las edificaciones y de la infraestructura, tanto nuevas como las existentes, y no concentrarse en pronósticos y alarmas, como si fueran la mejor o única opción.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Todos los autores contribuyeron a la concepción y diseño del estudio. La preparación del material, recopilación, análisis de datos y primer borrador del manuscrito fueron realizados por Sergio Mora Castro y Gerardo Javier Soto Boinilla. Todos los autores corrigieron, comentaron e hicieron aportes significativos a las versiones anteriores del manuscrito.

to. Todos los autores leyeron y aprobaron el manuscrito final. Todas las figuras son de la autoría y elaboración propia de los autores, específicamente para este artículo.

DECLARACIÓN DE CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe, en el contenido de este artículo, aspecto alguno que pudiese relacionarse o vincularse con cualquier tipo de conflicto de interés.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R., Melgar, D. (2019). Earthquake Early Warning: Advances, Scientific Challenges, and Societal Needs *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2019. 47,361–388. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060457>
- Alvarado, G. (2023). Terremoto pronosticado de Nicoya: Fundamentos científicos, incertidumbres, consecuencias y recomendaciones. Instituto Costarricense de Electricidad. Red Sismológica Nacional. Universidad de Costa Rica. Comisión Nacional de Prevención del Riesgo y Atención de Emergencias. Informe inédito
- Arroyo, M. (2023). Riesgo sísmico ante terremotos potencialmente perjudiciales en la Gran Área Metropolitana de Costa Rica (GAM). *Revista Geológica de América Central* (69), 1–33. <https://doi.org/10.15517/rgac.2023.54878>
- Bunge, M. (2014). *Pseudociencias: ¡Vaya timo!*. Editorial Laetoli. Colección Biblioteca Bunge. Pamplona, España. ISBN: 9788492422708. <https://www.marcialpons.es/libros/las-pseudociencias/9788492422708/>
- Cambridge Dictionary (s.f.). Dictionary. <http://dictionary.cambridge.org/>
- CAPRA-ROBOT (s.f.). Análisis probabilístico del riesgo derivado de las amenazas geológicas y de la vulnerabilidad asociada. <https://ingeniar-risk.com/servicios/software/modulos-del-capra-robot/>
- Cardona, O.D., Marulanda, M.C., Marulanda, P.M., Bernal, G.A., Carreño, M.L., Villegas, C.P., Molina, J.F., Herrera, S.A., Rincón, D.F., Grajales, S., Gonzalez, D., Maskrey, A. (2023a). Measuring Infrastructure Disaster Risk Resilience at the Global Level, Background Report, INGENIAR: Risk Intelligence for the CDRI Flagship Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27937.58726>
- Cardona, O.D., Bernal, G.A., Villegas, C.P., Molina, J.F., Herrera, S.A., Marulanda, M.C., Rincón, D.F., Grajales, S., Marulanda, P.M., Gonzalez, D., Maskrey, A. (2023b). Multi-hazard Disaster Risk Model of Infrastructure and Buildings at the Global Level. Background Report, INGENIAR: Risk Intelligence for the CDRI Flagship Report. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.11160.37124>
- Carvajal, A., Ito, T., Protti, M., Kimura, H. (2019). Earthquake potential in Costa Rica using three scenarios for the Central Costa Rica Deformed Belt as western boundary of the Panama Microplate. *Journal of South American Earth Sciences* (97), 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102375>
- Carranza, M. (2017). Sistema de alerta sísmica temprana para el sur de la Península Ibérica: determinación de los parámetros. (Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica). <https://docta.ucm.es/entities/publication/11ccf7e3-ce96-4421-8143-40aa50122dd2>
- City of Los Angeles (LADBS) (s.f.). Mandatory Retrofit Programs. <https://www.ladbs.org/services/core-services/plan-check-permit/plan-check-permit-special-assistance/mandatory-retrofit-programs?os=..&ref=app>
- Climent, A., Rojas, W., Alvarado, G., Benito, B. (2008). Evaluación de la amenaza sísmica en Costa Rica. Proyecto RESIS II. Norwegian Seismic Array (NORSAR); Red Sismológica Nacional; Escuela Centroamericana de Geología; Instituto Costarricense de Electricidad. https://rsn.ucr.ac.cr/images/Biblioteca/Informes_sismos/amenaza_sismica_cr.pdf
- Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI). (s.f. a). Multi-hazard Risk Country Profile, Costa Rica. <https://gri.unep-grid.ch/facts-figures/multi-hazards>

- Coalition for Disaster Resilient Infrastructure (CDRI). (s.f. b). Earthquake hazard Risk Country Profile, Costa Rica. <https://giri.unepgrid.ch/facts-figures/earthquake>
- Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2011). Código Sísmico de Costa Rica. 4a. ed. Editorial Tecnológica de Costa Rica, Cartago. <https://isbn.cloud/9789977663630/codigo-sismico-de-costa-rica-2010/>
- Comisión Asesora Permanente Régimen de Construcción Sismorresistente de Colombia. (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismorresistente NSR-10. https://www.confinedmasonry.org/wp-content/uploads/2018/11/Colombia-NSR-10-reglamento_construccion_sismo_resistente.pdf
- Comité Técnico Guía Boliviana de Diseño Sísmico. (2020). Guía Boliviana Diseño Sísmico. Ministerio de Obras Públicas. Servicios, Vivienda. <https://es.slideshare.net/TheJamez/gbds-2020-bolivia>
- Decreto N°. 10. de 1910 (Municipalidad de Cartago, Cartera de Gobernación). Reglamento de construcciones urbanas. 29 agosto de 1910. <https://www.codigosismico.or.cr/descargas/decreto1910cartago.pdf>
- Dirección General de Políticas y Regulación del Perú. Construcción y Saneamiento. Diseño Sismorresistente. (2019). Resolución Ministerial No. 043-2019 Vivienda. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2366641/51%20E.030%20DISE%C3%91O%20SISMORRESISTENTE%20RM-043-2019-VIVIENDA.pdf>
- Dixon, T., Schwartz, S., Protti, M., González, V., Newman, A., Marshall, J., Spotila, J. (2013). Detailed Data Available for Recent Costa Rica Earthquake. EOS. Transactions American Geophysical Union. (94), Issue 2. 17–18. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2013EO020001>
- Dixon, T., Jiamg, Y., Malseversi, R., McCaffrey, N., Voss, M., Protti, M., Gonzalez, V. (2014). Earthquake and tsunami forecasts: Relation of slow slip events to subsequent earthquake rupture. Proceed-ings National Academy of Sciences (111). 48-70. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1412299111
- ERN-INGENIAR-CAPRA (2015). Análisis del riesgo sísmico en San José. Informe técnico ERN-CAPRA-T27. Tomo II. https://ecapra.org/sites/default/files/documents/ERN-CAPRA-R5-T2.7%20-%20Terremoto%20San%20Jos%C3%A9_COR.pdf
- Feng, L., Newman, A., Protti, M., González, V., Jiang, Y., Dixon, T. (2012), Active deformation near Nicoya Peninsula, NW Costa Rica, 1996-2010: Interseismic megathrust coupling. Journal of Geophysical Research. Solid Earth. (117) B6. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JB009230>
- Geller, R. (2017). Seismology: Japan must admit it can't predict quakes. Nature (545). 289. <https://doi.org/10.1038/545289c>
- Global Earthquake Model (GEM). (s.f.). Costa Rica Risk Profile. https://github.com/gem/risk-profiles/tree/master/Caribbean_Central_America/Costa_Rica
- Hobbs, T., Newman, A., Protti, M. (2019). Enigmatic upper-plate sliver transport paused by megathrust earthquake and after-slip. Earth and Planetary Science Letters (520). 87-93.
- Houg, S. (2007). Richter's Scale. Measure of an Earthquake, Measure of a Man. Princeton University Press (144) 6. ISBN 9780 691 12807 8. <https://pubs.geoscienceworld.org/geomag/article-abstract/144/6/1027/138555/hough-s-e-2007-richter-s-scale-measure-of-an>
- Instituto Nacional de Normalización de Chile. (2019). Diseño sísmico de edificios. Norma Oficial NCh 2369. 51pp. [https://www.bcn.cl/catalogo/client/es_CL/publico/search/detailnonmodal/ent:\\$002f\\$002fSD_ILS\\$002f0\\$002fSD_ILS:233692/ada?qu=&nov=1](https://www.bcn.cl/catalogo/client/es_CL/publico/search/detailnonmodal/ent:$002f$002fSD_ILS$002f0$002fSD_ILS:233692/ada?qu=&nov=1)
- Jiang, Y., Wdowinski, S., Dixon, T., Hackl, M., Protti, M., Gonzalez, V. (2012). Slow slip events in Costa Rica detected by continuous GPS observations: 2002–2011. Geochemistry, Geophysics, Geosystems. (13) Q04006. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2012GC004058>.
- Jiang, Y., Liu, Z., Davis, E., Schwartz, S., Dixon, T., Voss, N., Malservisi, R., Protti, M. (2017). Strain release at the trench during shallow slow slip: The example of Nicoya Peninsula, Costa Rica, Geophysical Research Letters (44). <https://doi.org/10.1029/2012GC004058>
- Laporte, M; Miranda, P; Montero, W; Mora, S; Morales, L; Santana, G; Soto, G. (2023). Anticipaciones, pronósticos y predicciones sísmológicas: El caso de la región de Osa, Costa Rica. Delfino. Teclado Abierto. <https://delfino.cr/2023/06/de-anticipaciones-pronosticos-y-predicciones-sismologicas-el-caso-de-la-region-de-osa-costa-rica>
- Lay, Y., Schwartz, S., Rivera, L., Protti, M. (2013). The 5 September 2012 Nicoya, Costa Rica Mw 7.6 earthquake rupture process from joint inversion of high-rate GPS, strong-motion, and teleseismic P wave data and its relationship to adjacent plate boundary interface properties. Journal of Geophysical Research. Solid Earth (118). 10. 5453-5466. <https://doi.org/10.1002/jgrb.50379>

- Malservisi, R., Schwartz, S., Voss, N., Protti, M., González, V., Dixon, T., Jiang, Y., Newman, A., Richardson, A., Walter, J. (2015). Multiscale postseismic behavior on a megathrust: The 2012 Nicoya earthquake, Costa Rica. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* (16). 6. 1848-1864. <https://doi.org/10.1002/2015GC005794>
- Mena, M. (2023). ¿Sismo de magnitud 10,4? OVSICORI explica error y descarta ese potencial en Costa Rica. *El Observador*. <https://observador.cr/sismo-de-magnitud-10-4-ovsicori-explica-error-y-descarta-ese-potencial-en-costa-rica/>
- Miranda, P. (2019). Historia del Código Sísmico de Costa Rica. SismoCon. Comisión del Código Sísmico de Costa Rica. Universidad Fidelitas. Informe inédito.
- Merriam-Webster. (s.f.). Dictionary. Recuperado el 24 de mayo de 2024. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/>
- Montero P., W. (1986). Períodos de recurrencia y tipos de secuencias sísmicas de los temblores interplaca e intraplaca en Costa Rica. *Revista geológica de América Central*. (5). 35-72. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i05.12267>
- Montero, W; Camacho, E; Climent, A; Espinoza, A; Boschini, I. (1994). Sismicidad y marco neotectónico de Costa Rica y Panamá. *Revista Geológica de América Central*. Número especial, terremoto de Limón de 1991. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.13424>
- Mora, S; Saborío, J; Asté, J; Prepetit, C ; Joseph, V ; Matera, M. (2012). Slope instability hazard in Hai-ti: Emergency assessment for a safe reconstruction. Banff, Alberta, Canada. Keynote speech. *Land-slides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*. Eberhardt et al. (eds) © 2012 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-62123-6; <https://www.researchgate.net/publication/275961636>
- Mora, S. (2021). La Geodinámica externa: Aspectos geomecánicos, hidrogeológicos, climáticos y del riesgo. Bejerman, N.; Pérez, M.; Bunicontró, M. (Eds.). 1a ed. Córdoba, Argentina. Editorial ASA-GAI, 2022. Libro digital PDF. ISBN 978-987-21766-8-6. <https://asagai.org.ar/la-geodinamica-externa-aspectos-geomecanicos-hidrogeologicos-climaticos-y-del-riesgo/> ; https://www.amazon.com/gp/product/B0B728KLNN/ref=as_li_tl?ie=UTF8&creativeASIN=B0B728KLNN&linkCode=as2
- Morales, L. (1994). Daños causados por el Terremoto de Limón: pérdidas y medidas de mitigación. *Revista Geológica de América Central*. Número especial, Terremoto de Limón de 1991. <https://doi.org/10.15517/rgac.v0i0.13455>
- Muñoz, A. (2023). Terremotos, fenómeno devastador que la ciencia aún no es capaz de anticipar. Portal de Investigación. Vicerrectoría de Investigación. *Heraldo*; Tercer Milenio. <https://www.heraldo.es/noticias/sociedad/2023/02/28/terremotos-fenomeno-devastador-ciencia-no-capaz-anticipar-1633689.html>
- National Earthquake Prediction Evaluation Council-NEPEC. (s.f.). National Earthquake Hazard Reduction Program (NEHRP). U. S. Dept. of the Interior. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/programs/earthquake-hazards/national-earthquake-prediction-evaluation-council-nepec>
- Nishenko, S. (1989). Circum-pacific seismic potential 1989-1999. U.S. Dept. of the Interior. Geological Survey, NEIC. Open File Report. 86-189. <https://doi.org/10.1007/BF00880240>
- Nishenko, S. (1991). Circum-Pacific seismic potential, 1989-1999. *Pure Applied Geophysics*. (135) 169-259. <https://doi.org/10.3133/ofr8986>
- Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica (OVSICORI). (2023). ¿Sismo de magnitud 10,4? OVSICORI explica el error y descarta ese potencial en Costa Rica. (Video). <https://www.youtube.com/watch?v=ePFUJYmuUoM>
- Orden XI. No. 492-A de 1841. (Departamento de Gobernación de Costa Rica). Instrucción sobre construcción de edificios para edificar con firmeza. Orden del Gobierno con motivo de la ruina que causó el terremoto del 2 de setiembre del presente año. <http://www.ovsicori.una.ac.cr/sistemas/biblioteca/ovsicori/Riesgos/Riesgo%20Sismico%20en%20Cartago/doc1080-8a.pdf>
- Protti, M., Güendel, F., Malavassi, E. (1991). Evaluación del potencial sísmico de la península de Nicoya. Universidad Nacional, Heredia. EFUNA. 1ª. Edición. <https://isbn.cloud/9789968140867/evaluacion-del-potencial-sismico-de-la-peninsula-de-nicoya/>
- Protti, M., González, V., Newman, A., Dixon, T., Schwartz, S., Marshall, J., Feng, L., Walter, J., Mal-servisi, R., Owen, S. (2014). Nicoya earthquake rupture anticipated by geodetic measurement of the locked plate interface. *Nature Geoscience* (7). 117–121. <https://doi.org/10.1038/ngeo2038>
- Protti, M., Bangs, N., Baumgartner, P., Fisher, D., Kaneda, Y., LaFemina, P., Newman, A., Noren, A., Schwartz, S., Suyehiro, K. (2016). Osa Peninsula, Costa Rica: A unique opportunity for inland drilling and instrumenting of seismogenic zone of large megathrust earthquakes. White Paper. Subduction Zone Observatory Workshop. Boise, Idaho. <https://>

www.researchgate.net/publication/368102225_Osa_Peninsula_Costa_Rica_A_unique_opportunity_to_drill_and_instrument_the_seismogenic_zone_of_large_megathrust_earthquakes

- Real Academia Española (RAE). (s.f.). Diccionario de la lengua española. Recuperado el 22 de mayo de 2024 de <https://dle.rae.es/cultura?m=form>
- Saad, O., Chen, Y., Savvaidis, A., Fomel, S., Jiang, X., Huang, D., Oboué, Y., Yong, S., Wand, X., Zhang, X., Chen, Y. (2023). Earthquake Forecasting Using Big Data and Artificial Intelligence: A 30-Week Real-Time Case Study in China. *Bull. Seismological Society of America*. (113). 6. 2461–2478. <https://doi.org/10.1785/0120230031>
- Saegusa, A. (1999). Japan to try to understand quakes, not predict them. *Nature*. (97). 284. <https://doi.org/10.1038/16758>
- Sendai Framework Terminology. (2015). Disaster Risk Reduction. <https://www.undrr.org/terminology/disaster-risk-management>
- Silva, V., Taherian, A., Sousa, C. (2023). Earthquake early warning for Portugal: part 2 – where is it beneficial? *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01715-w>
- Thorsberg, C. (2024). Could A.I. Help Seismologists Predict Major Earthquakes?. *Smithsonian Magazine*. <https://www.smithsonianmag.com/smart-news/ai-help-seismologists-predict-major-earthquakes-180983519/>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction-UNDRR. (s.f.). Glossary. <https://www.undrr.org/drr-glossary>
- United Nations Disaster Risk Reduction-UNDRR. (s.f.). Inclusive early warning action: Checklist and implementation. <https://www.undrr.org/publication/inclusive-early-warning-early-action-checklist-and-implementation-guide>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction-UNDRR. (s.f.). Early warning systems and early action in fragile, conflict, and violent contexts: Addressing growing climate & disaster risks. Centre for Excellence. Climate and disaster Resilience. <https://www.undrr.org/publication/early-warning-systems-and-early-action-fragile-conflict-and-violent-contexts-addressing>
- United Nations Office for Education and Science-UNESCO. (2010). Glossary of basic terminology on disaster risk reduction. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000225784>
- Uyeda, S; 2013. On Earthquake Prediction in Japan. *Proceedings. Japan Academy. Series B (89).9*. <http://dx.doi.org/10.2183/pjab.89.391>
- Voss, N., Malservisi, R., Dixon, H., Protti, M. (2017). Slow slip events in the early part of the earthquake cycle. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth (122)*. 8. 6773-6786. <https://doi.org/10.1002/2016JB013741>
- Voss, N., Dixon, H., Liu, Z., Malservisi, R., Protti, M. (2018). Do slow slip events trigger large and great megathrust earthquakes? *Science Advances (4)*. 10. <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aat8472>
- Walter, J., Schwartz, S., Protti, M., Gonzalez, V. (2013). Synchronous occurrence of shallow tremor and very low frequency earthquakes offshore of the Nicoya Peninsula, Costa Rica. *Geophysical Research Letters*. 40(8), 1517-1522. <https://doi.org/10.1002/grl.50213>
- Walter, J., X. Meng, Z., Peng, S., Schwartz, A., Newman, V., Protti, M. (2015). Farfield triggering of fore-shocks near the nucleation zone of the 5 September 2012 (Mw 7.6) Nicoya Peninsula, Costa Rica earthquake. *Earth and Planetary Science Letters* 431, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2015.09.017>
- Wikipedia. (s.f.). Lists of 21st-century earthquakes. https://en.wikipedia.org/wiki/Lists_of_21st-century_earthquakes
- Word Reference (s.f.). Glossary. Versión en español. Recuperado el 18 de mayo de 2024. <https://www.wordreference.com/definicion/pron%C3%B3stico>
- World Health Organization. (s.f.). Glossary of Health Emergency and Disaster Risk Management Terminology <https://www.who.int/publications/i/item/9789240003699>
- Xie, S., Dixon, T., Malservisi, R., Jiang, Y., Protti, M., Muller, C. (2020). Slow slip and Inter-transient locking on the Nicoya megathrust in the late and early stages of an earthquake cycle. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth (125)*. 11. <https://doi.org/10.1029/2020JB020503>
- Yao, D., Walter, J., Meng, X., Hobbs, T., Peng, Z., Newman, A., Schwartz, S., Protti, M. (2017). Detailed spatiotemporal evolution of microseismicity and repeating earthquakes following the 2012 Nicoya earthquake. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*. (122) 1 524–542. <https://doi.org/10.1002/2016JB013632>