



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Actividades enfocadas en el
análisis de casos para el curso
de la Geología Física de la carrera
de Ingeniería Geológica**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Guillermo Gail Martínez Ruiz

ASESORA DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dra. Laura Mori



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ACTIVIDADES ENFOCADAS EN EL ANALISIS DE CASOS PARA EL CURSO DE LA GEOLOGIA FISICA DE LA CARRERA DE INGENIERIA GEOLOGICA que presenté para obtener el título de INGENIERO GEÓLOGO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

GUILLERMO GAIL MARTINEZ RUIZ
Número de cuenta: 317173295

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
BIBLIOGRAFÍA	1
ACTIVIDADES	2
Caso 1. La erupción del volcán Eyjafjallajökull en 2010: preparación local y efectos globales	3
Caso 2. El terremoto de 2015 en Gorkha, Nepal: el pronóstico de una catástrofe	10
Caso 3. De Kobe 1995 a Tohoku 2011: lecciones de dos terremotos para la prevención y mitigación de desastres	13
Caso 4. Terremoto, tsunami y desastre nuclear en Japón (2011): una catástrofe de múltiples dimensiones	19
Caso 5. El tsunami del Océano Índico de 2004: lecciones de una tragedia global	24
Caso 6. La Conchita: dos deslizamientos (1995 y 2005) y un riesgo que persiste	30
Caso 7. Cuando la tierra no se detiene: la historia del deslizamiento en Portuguese Bend, California	38
Caso 8. El río Misisipi y sus crecidas (1973-2008): procesos naturales e intervención humana	42
Caso 9. ¿Por qué se inunda Houston? Lluvias extremas, expansión urbana y falta de prevención	47
Caso 10. La Isla Folly: dinámica costera, erosión y manejo del riesgo geológico	52
RESPUESTAS	58
Caso 1. La erupción del volcán Eyjafjallajökull en 2010: preparación local y efectos globales	59
Caso 2. El terremoto de 2015 en Gorkha, Nepal: el pronóstico de una catástrofe	61
Caso 3. De Kobe 1995 a Tohoku 2011: lecciones de dos terremotos para la prevención y mitigación de desastres	62
Caso 4. Terremoto, tsunami y desastre nuclear en Japón (2011): una catástrofe de múltiples dimensiones	64
Caso 5. El tsunami del Océano Índico de 2004: lecciones de una tragedia global	66
Caso 6. La Conchita: dos deslizamientos (1995 y 2005) y un riesgo que persiste	68
Caso 7. Cuando la tierra no se detiene: la historia del deslizamiento en Portuguese Bend, California	70
Caso 8. El río Misisipi y sus crecidas (1973-2008): procesos naturales e intervención humana	72
Caso 9. ¿Por qué se inunda Houston? Lluvias extremas, expansión urbana y falta de prevención	74
Caso 10. La Isla Folly: dinámica costera, erosión y manejo del riesgo geológico	76

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta una serie de 10 actividades didácticas enfocadas en el análisis de casos para el curso de Geología Física de la carrera de Ingeniería Geológica.

En cada actividad se proporciona información sobre un evento geológico, para que las y los estudiantes analicen los mecanismos y condiciones que lo desencadenaron y exploren los factores naturales y antropogénicos que podrían haberlo agravado. También examinan su impacto en la población en el corto y largo plazo, lo que les permite visualizar la estrecha relación entre geología, ingeniería y sociedad. Las actividades se enfocan en eventos geológicos ocurridos en diferentes regiones del mundo, para resaltar las problemáticas y desafíos con los que se enfrentan distintas comunidades y ofrecer una visión más integral de los fenómenos geológicos y sus efectos.

Para la elaboración de las actividades, se han utilizado algunos de los casos descritos en Keller y DeVecchio (2019), los cuales se han traducido y adaptado para el curso de Geología Física. Por cada caso, se han elaborado 5 preguntas que guían al alumnado en el análisis. Cada pregunta permite explorar uno de los 5 conceptos fundamentales que, según Keller y DeVecchio (2019), constituyen el marco de referencia para el análisis de peligros naturales: 1) la ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales; 2) conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas; 3) los peligros naturales están interconectados; 4) las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes; 5) es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales. En este sentido, las preguntas permiten analizar en qué manera la ciencia contribuyó a predecir el evento, evaluar hasta qué punto el conocimiento del riesgo influyó en la toma de decisiones antes y después del evento, identificar conexiones entre el evento principal y otros peligros naturales, examinar cómo las actividades humanas afectaron la magnitud del fenómeno, y discutir las medidas que se tomaron para reducir los impactos.

La implementación de la estrategia didáctica del análisis de casos en el curso de Geología Física enriquecerá la experiencia de aprendizaje de las y los estudiantes, permitiéndoles lograr una comprensión más profunda e integral de los fenómenos geológicos y desarrollar habilidades de análisis, evaluación y pensamiento crítico. Esta estrategia también podrá promover el desarrollo de habilidades de colaboración y comunicación efectiva, ya que fomenta la discusión en grupo. Finalmente, al mostrar el impacto tangible que su formación geológica puede tener en la sociedad, esta metodología reforzará la motivación del alumnado y su compromiso con la carrera.

BIBLIOGRAFÍA

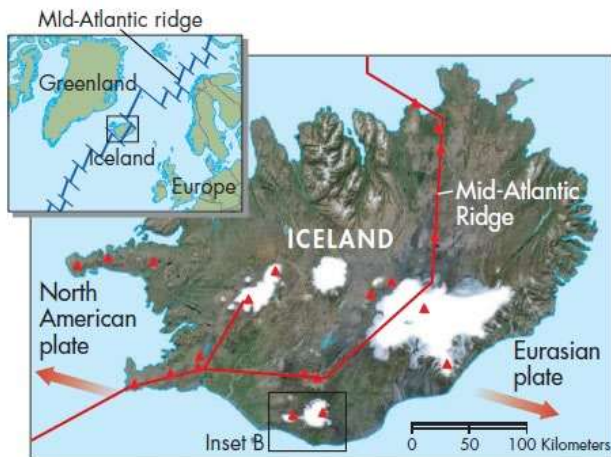
- Keller, E., DeVecchio, D., 2019. Natural hazards: Earth's processes as hazards, disasters, and catastrophes (5th edition). Routledge.

ACTIVIDADES

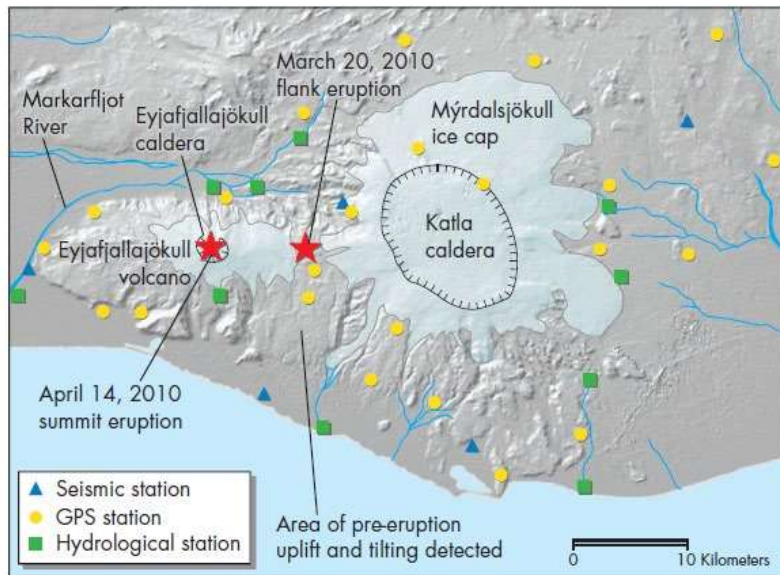
Caso 1

La erupción del volcán Eyjafjallajökull en 2010: preparación local y efectos globales

Islandia alberga más de treinta volcanes activos, lo cual no resulta sorprendente si se considera su ubicación sobre la Dorsal Mesoatlántica (Figura 1a). La isla también se encuentra sobre una pluma del manto, lo cual incrementa la productividad magmática y la actividad volcánica. El proceso de formación del magma en este contexto tectónico (fusión por descompresión del manto astenosférico) hace que la mayoría de las erupciones en Islandia sean efusivas, por lo que sus efectos suelen limitarse a la isla y, a menudo, pasan desapercibidos para el resto del mundo. Todo esto cambió con la erupción del volcán Eyjafjallajökull en 2010.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Islandia se encuentra sobre una margen de placas divergente. El mapa de la isla muestra la ubicación de sus principales volcanes y casquetes glaciares. (b) Distribución de los equipos de monitoreo alrededor de los volcanes Eyjafjallajökull y Katla, en la punta sur de Islandia. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El hecho de que Islandia tenga erupciones frecuentes implica que sus habitantes y el gobierno deben de estar constantemente preparados. Por esta razón, en 2006 se implementó una prueba a gran escala del

plan de evacuación para una eventual erupción del Katla, el volcán más grande y activo ubicado al este de Eyjafjallajökull. Por otra parte, la Oficina Meteorológica de Islandia opera una compleja red de equipos de monitoreo y alerta temprana (Figura 1b), con 56 estaciones sísmicas y 70 estaciones GPS que registran de manera continua la actividad sísmica y el desplazamiento del terreno, indicadores del movimiento del magma. Además, una red automatizada de estaciones hidrológicas proporciona alertas tempranas de jökulhlaups (inundaciones provocadas por el derretimiento del hielo glaciar en contacto con el magma) a partir de mediciones del caudal y la temperatura de los ríos que descienden de los volcanes capeados por glaciares.

Desde los años noventa, se había detectado una actividad sísmica difusa y profunda por debajo de los volcanes Eyjafjallajökull y Katla. Sin embargo, en enero de 2010, los hipocentros se hicieron progresivamente más superficiales y se concentraron 5 kilómetros al este del cráter de Eyjafjallajökull. Asimismo, a principios de marzo, se detectó un levantamiento y un aumento de la inclinación del terreno en el flanco sureste del volcán, con tasas de deformación de hasta 5 milímetros por día. Estos datos no dejaban dudas de que el magma estaba ascendiendo desde grandes profundidades y se estaba acumulando a menos de 4 kilómetros de la superficie. Durante las dos semanas siguientes, el volcán siguió inflándose y la sismicidad aumentó de forma constante, registrándose hasta 1,000 sismos alrededor del 4 de marzo (Figura 2).

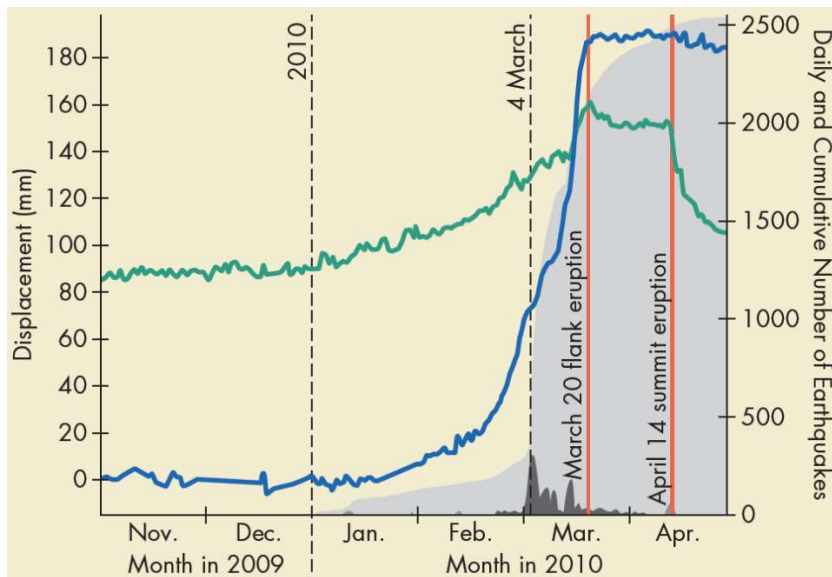


Figura 2. Actividad sísmica y desplazamiento del terreno antes y durante la erupción del volcán Eyjafjallajökull en 2010. Las líneas azul y verde muestran la inflación y deflación del edificio volcánico medidas desde dos estaciones GPS; en gris oscuro se indica el número de terremotos diarios; en gris claro, el número acumulado de sismos ocurridos desde principios de 2010. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

La erupción de Eyjafjallajökull ocurrió en dos fases: una efusiva, típica de los volcanes de Islandia, y una explosiva. La fase efusiva comenzó el 20 de marzo con la apertura de una fisura de 500 metros en un flanco del volcán, 10 kilómetros al este de la caldera. Durante esta fase, más de 25,000 turistas acudieron para presenciar el espectáculo de cortinas de fuego y cascadas de lava (Figura 3). Algunos incluso vieron cómo se abrió una segunda fisura 200 metros al noroeste de la primera.

Las erupciones fisurales, que emitieron paquetes de lava de 10 a 20 metros de grosor distribuidos en un área de 1.5 kilómetros cuadrados, finalizaron el 12 de abril. A pesar de esto, los datos de GPS no mostraban señales de deflación, lo que indicaba que el magma seguía ascendiendo y que la actividad volcánica podría prolongarse.



Figura 3. El volcán Eyjafjallajökull atrajo a una multitud de turistas durante la fase efusiva de la erupción. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El día sucesivo, se registró un incremento de la sismicidad bajo la caldera de Eyjafjallajökull, lo cual indicaba que el magma se estaba abriendo un nuevo camino hacia la superficie. En la madrugada del 13 de abril ocurrió una erupción explosiva bajo una capa de hielo de 200 metros de espesor (**Figura 4**). Se activaron los planes de emergencia y los residentes del lado sur del volcán fueron evacuados a la 01:00 a.m. A las 07:00 a.m., las estaciones hidrológicas ubicadas a los lados del volcán detectaron varios jökulhlaups, por lo que se evacuaron unas 800 personas residentes en los valles cercanos. Afortunadamente, las inundaciones tuvieron caudales relativamente pequeños (menores a 3,000 metros cúbicos por segundo) y las estructuras de control de inundaciones lograron proteger la mayoría de las carreteras y tierras agrícolas, aunque se reportaron daños en algunas granjas e infraestructuras locales (**Figura 5**).



Figura 4. Emisión de lava, ceniza y vapor durante la fase explosiva de la erupción del volcán Eyjafjallajökull. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Durante el primer día de la fase explosiva, se formó una columna piroclástica de más de 9 kilómetros de altura (**Figura 6**), que empezó a desplazarse hacia el continente europeo por efecto de los vientos. Debido a que la ceniza volcánica representa un serio peligro para los aviones en vuelo, la Autoridad de Aviación Civil declaró una zona de exclusión aérea para cualquier espacio donde la concentración de ceniza superara los 4 miligramos por metro cúbico. Para el 18 de abril, la mayoría de los vuelos hacia y desde

Europa se habían suspendido. El espacio aéreo del norte del continente permaneció cerrado por más de una semana, dejando varados a miles de viajeros y provocando pérdidas millonarias a las empresas que dependen del transporte aéreo (Figura 7). En el transcurso de abril, e incluso en el mes de mayo, varios aeropuertos tuvieron que cerrarse temporalmente, dependiendo de las fluctuaciones en la dirección, altura y velocidad de la nube de ceniza.

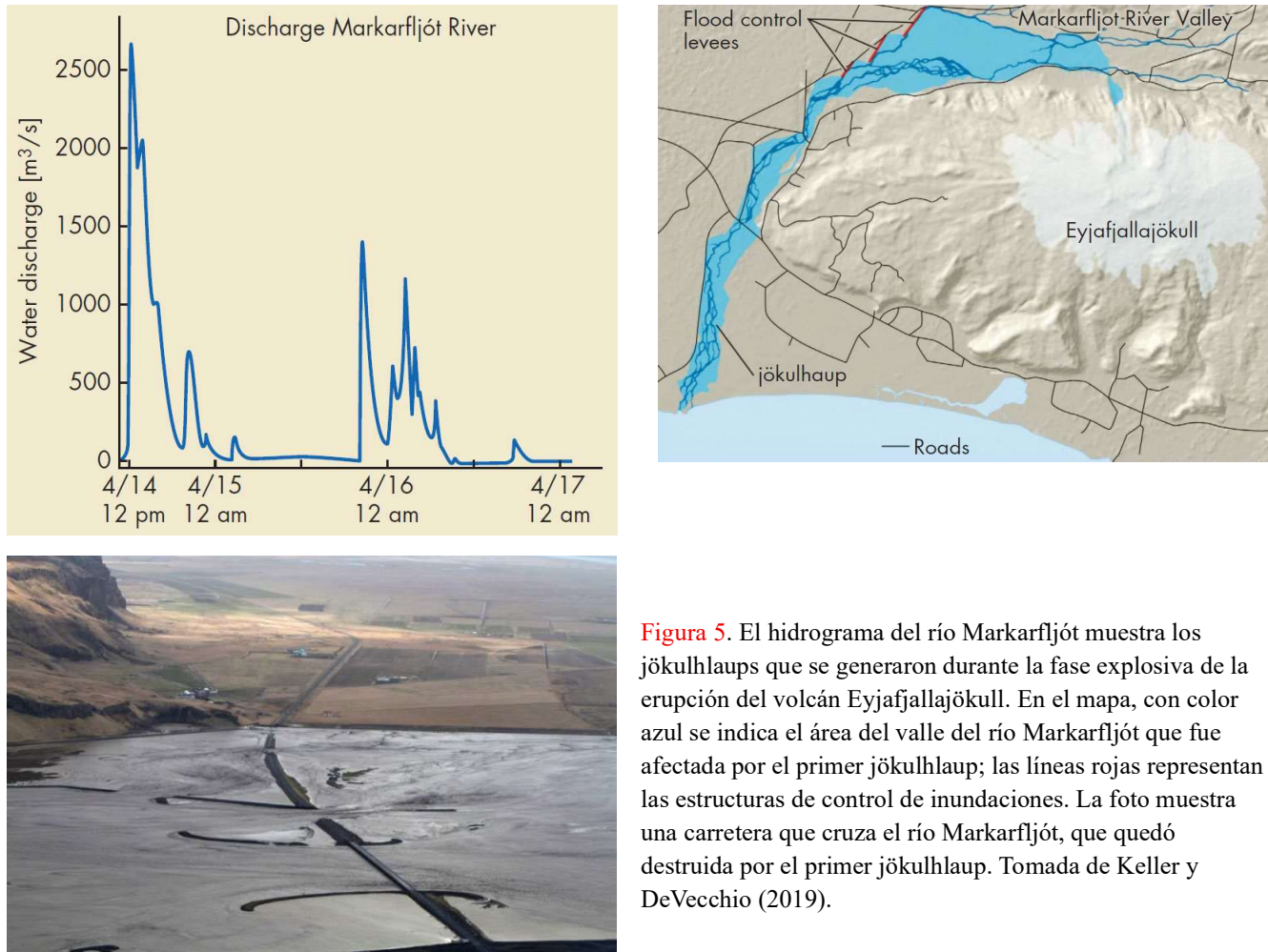


Figura 5. El hidrograma del río Markarfljót muestra los jökulhlaups que se generaron durante la fase explosiva de la erupción del volcán Eyjafjallajökull. En el mapa, con color azul se indica el área del valle del río Markarfljót que fue afectada por el primer jökulhlaup; las líneas rojas representan las estructuras de control de inundaciones. La foto muestra una carretera que cruza el río Markarfljót, que quedó destruida por el primer jökulhlaup. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Los vientos del sur que arrastraban la ceniza hacia el continente evitaron que gran parte de Islandia quedara cubierta; solo la porción sureste de la isla quedó cubierta por varios centímetros de ceniza y, desde la tarde del 17 de abril hasta la madrugada del día siguiente, quedó sumida en completa oscuridad por la caída de esta. La acumulación de ceniza causó problemas mayores a los granjeros locales (Figura 8), pues su alta concentración de fluoruros podía enfermar o matar al ganado si los animales la ingerían, inhalaban, o si bebían de arroyos contaminados (los fluoruros son solubles en agua). Por ello, se indicó a los granjeros que mantuvieran a sus animales en los establos y permanecieran dentro de sus hogares, lo cual resultó problemático debido a que había comenzado la temporada de partos. Además, estas instrucciones generaron confusión, ya que contradecían el plan de evacuación practicado en 2006, según el cual, durante una erupción, los animales debían ser liberados.



Figura 6. Una columna de ceniza volcánica se elevó desde el volcán Eyjafjallajökull alcanzando una altura de ~9.5 km. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

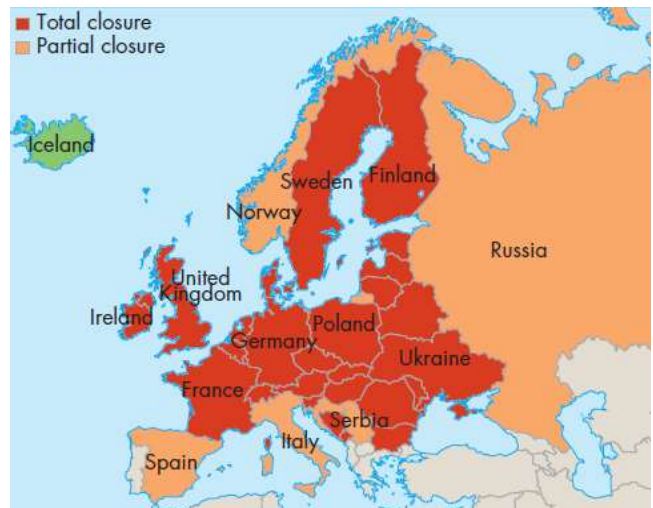


Figura 7. La imagen de satélite muestra el desplazamiento de la nube de ceniza de Eyjafjallajökull hacia el resto de Europa. A partir del 14 de abril, el espacio aéreo sobre la mayor parte de Europa fue cerrado parcial o completamente, afectando a unos 10 millones de viajeros. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El carácter más explosivo de la segunda fase eruptiva se debió principalmente a la interacción entre la lava y el hielo derretido del casquete glaciar: el enfriamiento rápido de la lava y la vaporización instantánea del agua provocaron la fragmentación explosiva del magma y la formación de ceniza fina que fue arrastrada hacia la atmósfera. Además, el magma emitido desde la caldera de Eyjafjallajökull tenía un mayor contenido de sílice, y por ende mayor viscosidad, que la lava emitida desde las fisuras laterales. Durante la fase explosiva, se estima que se emitieron aproximadamente 0.27 kilómetros cúbicos de magma.

La erupción de Eyjafjallajökull se declaró oficialmente concluida en octubre de 2010. No se registraron muertes directamente atribuibles a la erupción, aunque dos personas fallecieron en el contexto de sus viajes para presenciar la fase efusiva.



Figura 8. Granjeros rescatando al ganado de la caída de ceniza volcánica al sureste del volcán Eyjafjallajökull el 17 de abril. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Eyjafjallajökull solo había hecho erupción dos veces en los últimos mil años (la última entre 1821 y 1823), y ambas erupciones fueron relativamente pequeñas. Katla, en cambio, ha tenido 20 erupciones durante ese mismo periodo (la más significativa en 1918), muchas de las cuales tuvieron un carácter más explosivo. Por su historial eruptivo y al estar cubierto por un casquete glaciar más grande, Katla siempre se ha considerado una amenaza mayor. Aunque los científicos no creen que los sistemas magmáticos de los dos volcanes estén conectados, las dos erupciones anteriores de Eyjafjallajökull coincidieron con erupciones de Katla. Curiosamente, desde la erupción de Eyjafjallajökull en 2010, se está registrando un aumento en la actividad sísmica bajo la caldera del Katla, lo cual indica que el magma se está movilizando dentro del volcán y que una erupción podría estar próxima.

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. ¿Cómo se monitorea la actividad volcánica de Eyjafjallajökull y Katla? ¿Qué tipo de datos colectados entre enero y abril de 2010 permitieron anticipar la erupción de Eyjafjallajökull?

2. ¿Por qué, antes de 2010, Eyjafjallajökull se consideraba un volcán menos peligroso respecto a Katla, y cómo ha cambiado esta percepción después de la erupción de 2010?

3. Además de la caída de ceniza y los flujos de lava, la erupción de Eyjafjallajökull en 2010 ha impulsado la ocurrencia de otros fenómenos peligrosos, como los jökulhlaups. Explica qué son y cómo se generan estos peligros, e indica cuáles son las áreas geográficas que podrían verse más afectadas.

4. La baja densidad de población de Islandia y el entorno rural del volcán limitaron los efectos potencialmente catastróficos de la erupción de Eyjafjallajökull en 2010. ¿Qué podría haber ocurrido si al pie del volcán hubiera habido una ciudad?

5. Analiza el nivel de preparación del gobierno y de la población de Islandia frente a la erupción de Eyjafjallajökull en 2010: ¿qué tan eficaces fueron el monitoreo científico, el plan de evacuación y las medidas ingenieriles para la reducción del riesgo?

Caso 2

El terremoto de 2015 en Gorkha, Nepal: el pronóstico de una catástrofe

Nepal es un país asiático ubicado en la región de los Himalayas, una cadena montañosa originada por la colisión entre la placa Euroasiática y la placa Índica. El 25 de abril de 2015, el país fue afectado por un terremoto devastador que, en realidad, se había estado esperando.

Durante años, de hecho, diversos especialistas habían advertido que Katmandú, la capital del país, corría un alto riesgo de sufrir un terremoto de gran magnitud capaz de destruirla. Lo que más preocupaba a los científicos era el hecho de que no habían ocurrido grandes terremotos al noroeste de Katmandú entre los años 1505 y 1866 (Figura 1). Considerando que las placas tectónicas están convergiendo a una velocidad de 4.5 centímetros por año, en ese intervalo de tiempo de más de tres siglos debió de haberse acumulado una enorme cantidad de energía elástica, por lo que la ocurrencia de un sismo que liberara dicha tensión se consideraba inevitable.

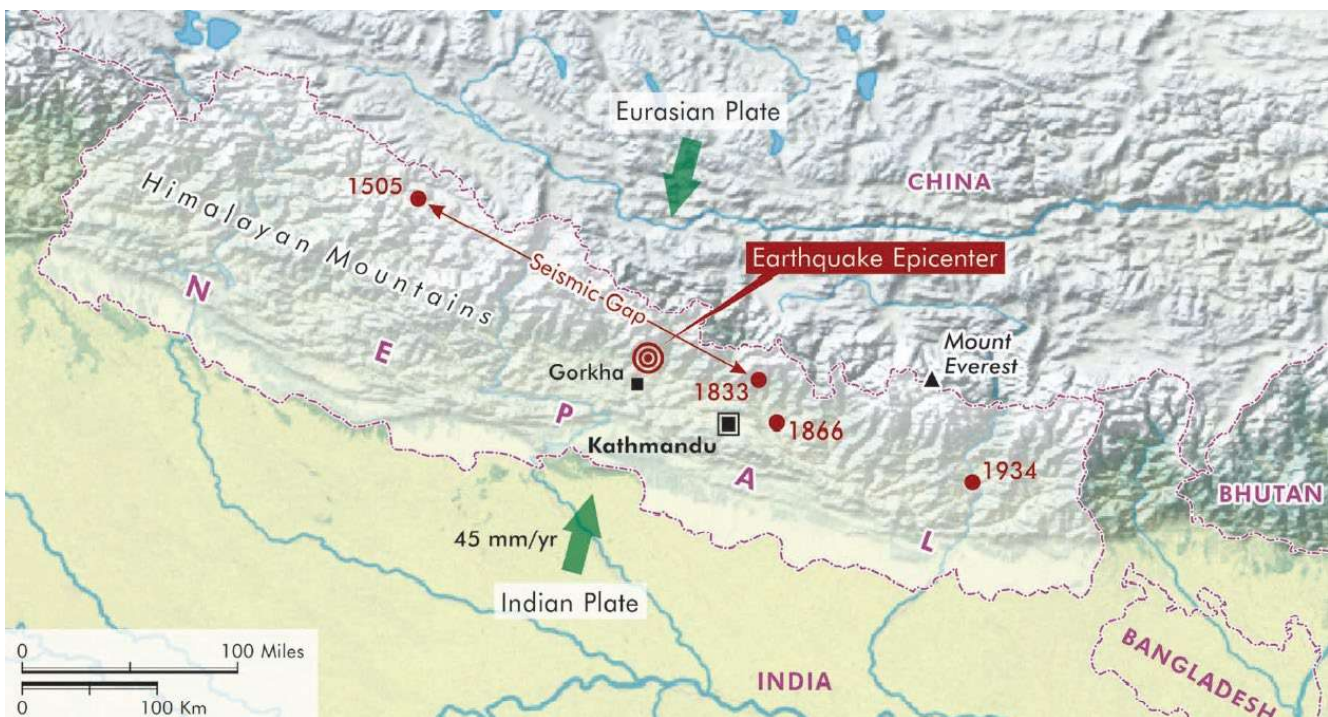


Figura 1. La ausencia de terremotos históricos (puntos rojos) al noroeste de Katmandú, en correspondencia de uno de los límites de placas más activos de la Tierra, llevó a los científicos a considerar que el terremoto de Nepal de 2015 era inminente. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

En abril de 2015, justo una semana antes del desastre, un grupo de sismólogos y expertos en ciencias sociales se había reunido en Katmandú para analizar el impacto catastrófico que un sismo de gran escala hubiera podido tener en la población y en la infraestructura del país. El 25 de abril, un desplazamiento de hasta 5 metros de la placa Euroasiática sobre la placa Índica a lo largo de una franja de 150 kilómetros provocó un terremoto de magnitud 7.8, cuyo epicentro se localizó en el distrito de Gorkha.

El movimiento telúrico elevó el valle de Katmandú hasta un metro. Considerando que aproximadamente el 10% de la población de Nepal habita en este valle y en las laderas empinadas que lo rodean, la

devastación registrada el 25 de abril fue, como lo habían advertido los expertos, de enormes proporciones. El terremoto cobró la vida de más de 9,000 personas. La principal causa de muerte en zonas urbanas fue el colapso de los edificios, lo cual era predecible, dada la falta de regulaciones estrictas en materia de construcción antisísmica. Varias ciudades fueron completamente destruidas por las vibraciones sísmicas, mientras que otras fueron devastadas por los movimientos en masa impulsados por el terremoto (**Figura 2**). En el monte Everest, ubicado a 20 kilómetros de distancia del epicentro, una avalancha provocada por el sismo ocasionó la muerte de 21 personas.



Figura 2. Numerosas comunidades situadas en las tierras altas que rodean Katmandú fueron devastadas por el terremoto y, además, afectadas por desprendimientos de rocas desde las laderas cercanas. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Para Nepal, el terremoto de 2015 fue una catástrofe nacional. Se estima que los daños superaron los 10,000 millones de dólares, que corresponden a la mitad del producto interno bruto del país. Aunque se prometieron miles de millones de dólares en ayuda internacional para la reconstrucción, dos años después del desastre decenas de miles de nepalíes tuvieron que enfrentar una tercera temporada de monzones viviendo en las residencias temporales.

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
 - Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
 - Los peligros naturales están interconectados.
 - Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
 - Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.
1. Antes del evento de 2015, ¿qué evidencias y conocimientos científicos permitieron anticipar que un sismo de gran magnitud afectaría Katmandú en el corto plazo?

2. A partir del conocimiento del riesgo sísmico en la región, ¿qué acciones podrían haberse implementado en Nepal antes del terremoto de 2015 para reducir su impacto?

3. ¿Qué otros peligros naturales se desencadenaron a partir del terremoto de Gorkha de 2015?

4. ¿Cuáles errores humanos contribuyeron a agravar las consecuencias del terremoto de Gorkha de 2015?

5. Tras el terremoto de Gorkha de 2015, ¿qué medidas podrían haberse implementado en Nepal para reducir el impacto de futuros eventos sísmicos?

Caso 3

De Kobe 1995 a Tohoku 2011: lecciones de dos terremotos para la prevención y mitigación de desastres

La isla de Japón se encuentra 200 kilómetros al oeste de la Trinchera de Japón, a lo largo de la cual la placa Pacífica subduce bajo la Euroasiática a una velocidad de 9 centímetros por año (Figura 1). Este contexto tectónico provoca que, cada año, Japón experimente alrededor de 1,000 terremotos de magnitud superior a 5. En las últimas dos décadas, el país también ha sufrido 17 sismos de magnitud entre 7 y 7.9 y tres sismos de magnitud superior a 8. Por la frecuencia con la que se enfrenta a este tipo de eventos, y por su disponibilidad económica y tecnológica, Japón es, a la fecha, el país mejor preparado en la gestión del riesgo sísmico.

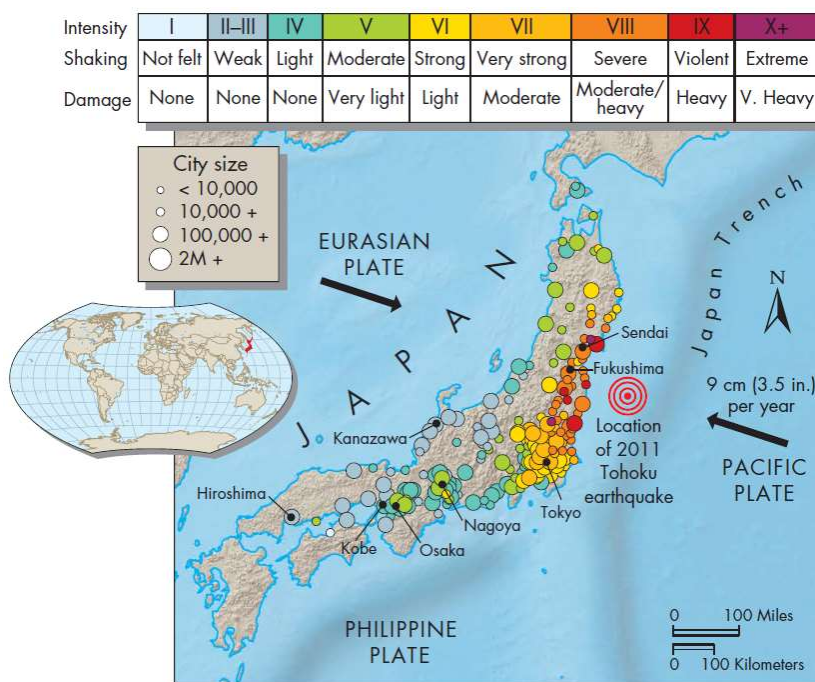


Figura 1. Contexto tectónico de la isla de Japón. El mapa muestra la ubicación del epicentro del terremoto de Tohoku de 2011, así como la intensidad de los daños provocados por el sismo de magnitud 9.0 en las principales ciudades de la isla. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Japón cuenta con la red de sismómetros más densa del mundo, la cual está conectada a un avanzado sistema de alerta temprana. Los edificios y la infraestructura del país están diseñados para resistir violentas vibraciones sísmicas. Además, la población recibe constantemente rigurosos entrenamientos sobre cómo reaccionar ante las alertas sísmicas. Este alto nivel de preparación se ha alcanzado tras décadas de aprendizaje derivado de desastres previos, siendo el terremoto de Tohoku, en 2011, el más reciente (Figura 1).

Aunque tuvo una magnitud menor con respecto al sismo de Tohoku, el terremoto de Kobe en 1995 (magnitud 6.8) provocó la muerte de 6,500 personas. La mayoría perecieron por el colapso de edificios antiguos que, al no estar obligados a cumplir con los códigos de construcción antisísmica implementados en 1981, no habían sido reforzados y resultaron extremadamente vulnerables.

Tras el sismo de Kobe, Japón adoptó un enfoque proactivo para minimizar los efectos de futuros terremotos: en específico, se reforzaron los edificios y la infraestructura existentes, y se invirtieron mil

millones de dólares en la mejora de la red nacional de sismómetros y el desarrollo de un sistema sofisticado de alerta temprana (Figura 2). Quince años después, Japón enfrentaría una nueva prueba, esta vez con un terremoto de magnitud mucho mayor.

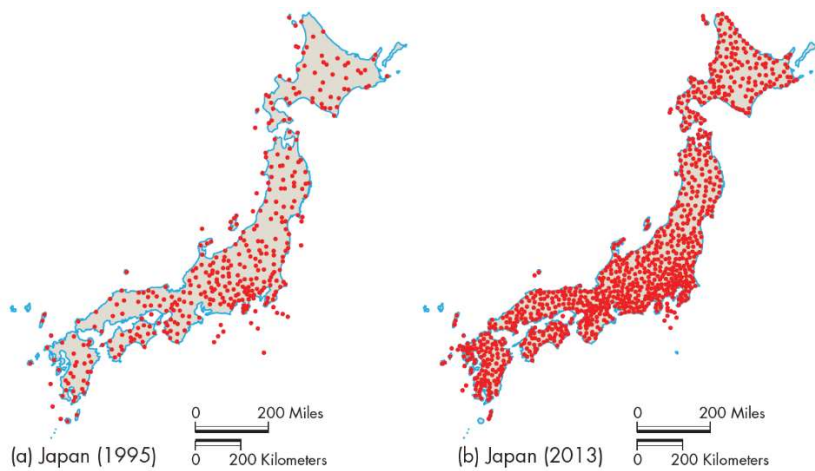


Figura 2. Después del sismo de Kobe, Japón ha invertido sumas extraordinarias en la optimización de la red nacional de sismómetros, que actualmente es la más densa del mundo. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El 9 de marzo de 2011, dos días antes del terremoto de Tohoku, la red sísmica detectó un sismo de magnitud 7.2 al este de Tohoku. La frecuencia y magnitud de los terremotos en esta región estaban bien documentadas, por lo que este evento no sorprendió a los sismólogos, quienes habían estimado una probabilidad del 60-70% de que ocurrieran sismos de magnitud 7 en el corto plazo. Lo que no se había anticipado era que este sismo fuera el precursor de un terremoto 500 veces más potente (Figura 3).

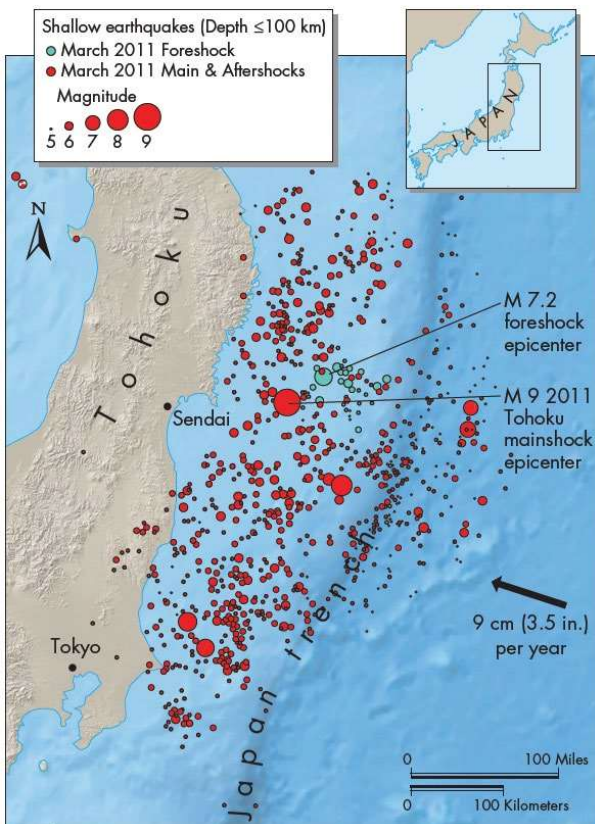


Figura 3. Ubicación de los epicentros de los sismos precursor y de las réplicas del terremoto de Tohoku de 2011. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El 11 de marzo a las 2:46 p.m., la placa del Pacífico se desplazó entre 40 y 60 metros por debajo de Japón, liberando la energía elástica acumulada durante los últimos mil años y generando el terremoto de magnitud 9.0 de Tohoku (**Figura 1**).

Este sismo no solo tuvo una magnitud mucho mayor que la máxima prevista por los sismólogos, sino que además generó un tsunami mucho más grande de lo esperado (**Figura 4**). De haber ocurrido en un país donde los edificios no contaran con medidas antisísmicas estrictas, las pérdidas humanas por colapsos estructurales habrían sido considerablemente mayores. En realidad, la mayoría de las víctimas (alrededor de 15,000) murieron a causa del tsunami. A pesar de esto, las lecciones aprendidas tras el terremoto de Kobe en 1995 y la implementación del sistema de alerta temprana permitieron salvar miles de vidas.



Figura 4. Helicópteros militares sobrevuelan la costa de Japón inundada por el tsunami de 2011. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Apenas 8 segundos después de que se detectaran las primeras ondas P, la red de sismómetros envió una alerta automática a 124 estaciones de televisión y 52 millones de teléfonos. Las infraestructuras críticas, como plantas de energía y trenes bala, se detuvieron de inmediato. En Sendai, ciudad cercana al epicentro, la alerta brindó 10 segundos para que los ciudadanos buscaran refugio antes de la llegada de las ondas S, mientras que, en Tokio, a 373 kilómetros del epicentro, los residentes tuvieron 80 segundos para prepararse antes de sentir las vibraciones sísmicas.

Desde entonces, se registraron cerca de 2,000 réplicas durante la primera semana, 39 de ellas con magnitudes superiores a 6, incluidas tres que superaron la magnitud 7 (**Figura 3**). Las estructuras construidas o reforzadas a partir de 1995 resistieron las sacudidas con pocos colapsos. Aunque muchos edificios sufrieron daños menores, los ocupantes lograron evacuar de manera segura, a diferencia de lo ocurrido en Kobe. La resistencia general de los edificios resulta especialmente notable si se considera que los códigos de construcción sísmica en la región cercana al epicentro se habían establecido considerando una magnitud máxima de sismo de 8.

Además de los enormes daños provocados por el tsunami, ocurrieron fenómenos de licuefacción que afectaron a carreteras, redes de servicios subterráneos (tuberías de agua, gas y alcantarillado) y más de 6,000 viviendas, incluso en Tokio (**Figura 5**). La magnitud de los daños provocados por la licuefacción destacó la necesidad de reevaluar las normativas de construcción en zonas urbanas susceptibles a dicho fenómeno.



Figura 5. Las tapas del sistema de alcantarillado subterráneo se salieron de la banqueta debido a la subsidencia provocada por la licuefacción. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El terremoto de Tohoku también desencadenó alrededor de 4,000 deslizamientos en las regiones montañosas a lo largo de la costa este de Japón. Los movimientos en masa provocaron la muerte de unas 20 personas, incluidas algunas que fallecieron cuando el colapso de una presa de tierra sepultó una pequeña comunidad cuesta abajo.

Las lecciones aprendidas antes y después del sismo de Tohoku han permitido avanzar en el entendimiento, predicción y mitigación de los peligros sísmicos. En las últimas dos décadas, Japón ha invertido decenas de miles de millones de dólares en este esfuerzo. El sismo y tsunami de Tohoku han sido el desastre natural más caro de la historia, costándole a Japón más de 200,000 millones de dólares. Las enseñanzas del terremoto de Kobe salvaron miles de vidas en 2011, y las de Tohoku seguirán contribuyendo a la reducción de riesgos, no solo en Japón, sino en todo el mundo.

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. Analiza los éxitos y las limitaciones de Japón en la predicción del sismo de Tohoku de 2011.

2. ¿Cómo ha influido el conocimiento del riesgo sísmico sobre las decisiones tomadas por el gobierno japonés antes y después del terremoto de 2011?

3. ¿Qué otros peligros naturales se desencadenaron a partir del terremoto de Tohoku de 2011?

4. ¿En qué manera las actividades humanas han contribuido a agravar los efectos del terremoto de Tohoku de 2011?

5. Describe y evalúa las estrategias que se implementaron en Japón tras el sismo de Kobe de 1995 para reducir los efectos de los terremotos.

Caso 4

Terremoto, tsunami y desastre nuclear en Japón (2011): una catástrofe de múltiples dimensiones

El 11 de marzo de 2011, un terremoto de magnitud 9.0 sacudió la región de Tohoku, en el noreste de Japón (Figura 1). En esta zona, la subducción de la placa Pacífica bajo la placa Euroasiática provoca una actividad sísmica intensa, por lo que la población japonesa está plenamente consciente de la probabilidad de que ocurran grandes terremotos, así como tsunamis.

Para minimizar el impacto de los tsunamis, Japón ha invertido miles de millones de dólares en la construcción de unos muros de contención que, con una extensión de 12,500 kilómetros, protegen el 40% de su línea costera. Estas barreras fueron diseñadas para contener olas de tsunamis de hasta 5 metros de altura, generadas por sismos de magnitud 8 o menor.

La magnitud del sismo de Tohoku en 2011 y la altura del tsunami que lo acompañó superaron por mucho esas previsiones (Figura 1). Pocos minutos después del terremoto, se emitieron alertas de tsunami gracias a las cuales las comunidades costeras más cercanas al epicentro tuvieron entre 12 y 15 minutos para evacuar. Aunque la población japonesa está bien entrenada sobre cómo actuar ante este tipo de emergencias, muchas personas subestimaron el riesgo de tsunami, debido a que la extensa red de muros de contención les proporcionó una falsa sensación de seguridad. Sin embargo, el desplazamiento vertical de hasta 9 metros del piso oceánico a unos 130 kilómetros de la costa generó olas de más de 10 metros de altura, que superaron y destruyeron los muros de contención (Figura 2). La inundación provocó una violenta erosión costera y destruyó casi todo a su paso, arrastrando escombros, vehículos, edificios y grandes embarcaciones marítimas hasta 10 kilómetros tierra adentro, y cobrando la vida de aproximadamente 15,000 personas.

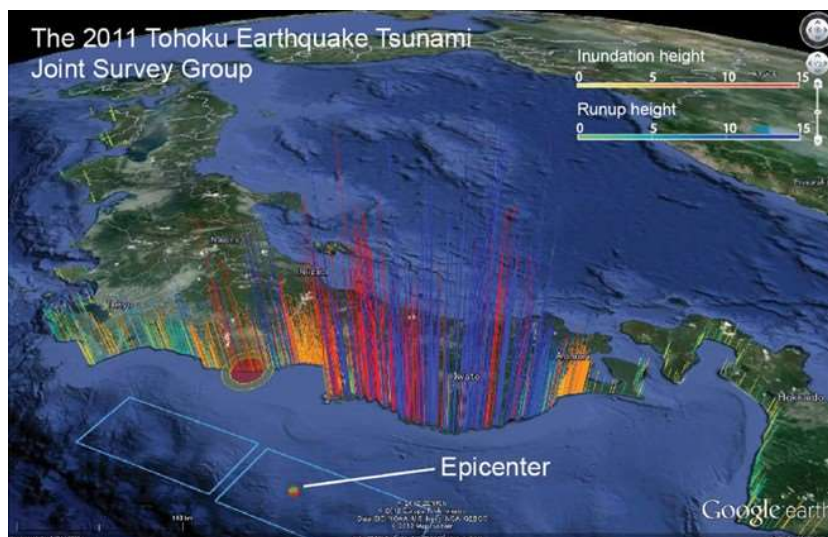


Figura 1. El terremoto de Tohoku en 2011, cuyo epicentro se ubicó 130 km mar adentro, produjo un tsunami que impactó las costas de Japón. Las líneas en tonos verdes-azules indican la altura de las olas que llegaron a la costa, mientras que las líneas amarillas-rojas indican la altura que alcanzó el agua en tierra firme. El círculo rojo señala la ubicación de la planta nuclear de Fukushima Daiichi. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Cabe mencionar que, a principios de la década de 2000, la identificación de antiguos depósitos de tsunami en el interior de la isla, lejos de la línea costera, había llevado a la comunidad científica a sugerir que un evento de mayor magnitud podría afectar las costas japonesas, y que las barreras existentes podrían no

ser suficientes para proteger a la población. Lamentablemente, estas advertencias fueron subestimadas y no trascendieron del ámbito académico.

Curiosamente, el poblado de Fudai logró sobrevivir al tsunami de 2011 gracias a la visión de un alcalde que, a finales de la década de 1960, insistió en construir un muro de contención de 16 metros de altura. Aunque en ese entonces los habitantes de la aldea consideraban la obra innecesaria y excesivamente costosa, el alcalde, marcado por el recuerdo de las víctimas del tsunami de 1933 y con memoria histórica del tsunami devastador de 1896, persistió en su decisión. Gracias a ello, Fudai se mantuvo a salvo, mientras que otras comunidades de la región fueron completamente destruidas.



Figura 2. Fotografías que documentan la llegada de la primera ola del tsunami a la costa de Japón, aproximadamente una hora y media después del terremoto de Tohoku de 2011. En la foto a la izquierda, se observa cómo la ola sobrepasa un muro de contención de 6 metros (el muro está completamente cubierto por el agua del mar), desbordándose sobre una carretera ubicada justo detrás. En la foto a la derecha, la ola sobrepasa un muro de contención de 4 metros e inunda la ciudad de Sendai, una de las primeras comunidades costeras afectadas por el fenómeno. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Uno de los efectos más graves del tsunami fue el desastre nuclear en la planta de Fukushima Daiichi (**Figura 1**). Al activarse la alerta sísmica, la planta se apagó de manera automática y se encendieron los generadores de emergencia para alimentar el sistema de enfriamiento de los reactores. Sin embargo, menos de una hora después del terremoto, las olas rompieron los muros de contención de la estación e inundaron los generadores, dejándolos inutilizables (**Figura 3**). Inevitablemente, el combustible nuclear de los reactores comenzó a sobrecalentarse hasta alcanzar la temperatura de fusión. La acumulación de hidrógeno en los edificios de contención ocasionó explosiones que liberaron partículas radiactivas, por lo cual se tuvieron que evacuar cerca de 200,000 personas en un radio de 20 kilómetros. Las condiciones de evacuación fueron especialmente difíciles, en particular para los adultos mayores, que representan el 25% de la población japonesa. Personas vulnerables y pacientes hospitalarios tuvieron que esperar días en condiciones extremas antes de ser trasladados a refugios temporales, donde hubo escasez de agua potable, alimentos y medicamentos. Se estima que unas 1,600 personas fallecieron debido a las condiciones precarias durante la evacuación.

Pese a los esfuerzos iniciales por contener la contaminación, en 2013 se confirmó que la planta de Fukushima Daiichi seguía filtrando agua radiactiva al Océano Pacífico. Actualmente, Japón continúa inyectando agua para enfriar el combustible altamente radiactivo. Esta agua, al contaminarse, es recolectada, tratada y almacenada, lo que ha generado nuevos retos técnicos y ambientales.



Figura 3. La foto a la izquierda muestra el momento en que el tsunami rebasó los muros de contención y golpeó la planta nuclear de Fukushima Daiichi. La imagen a la derecha muestra la llegada del agua a las unidades del reactor (https://www.bbc.com/mundo/video_fotos/2011/05/110520_fotos_tsunami_fukushima_japon).

El terremoto, tsunami y desastre nuclear de Tohoku en 2011 reactivaron el debate global sobre cómo prepararse ante fenómenos naturales poco frecuentes y de gran intensidad, y sobre cómo las actividades humanas pueden agravar sus efectos destructivos. Por ejemplo, en Alemania, después de varios meses de protestas antinucleares impulsadas por el desastre de Tohoku, el gobierno anunció que cerraría todas las plantas nucleares del país para el año 2022 (lo logró en 2023), debido a la percepción de que no se podía garantizar la seguridad en el proceso de generación de energía nuclear.

Aunque más de 180 kilómetros de muros de contención quedaron destruidos por el tsunami de 2011 y la barrera de protección falló en detener la inundación, estas medidas al menos lograron retrasar de algunos minutos la llegada de la primera ola, permitiendo salvar miles de vidas. Actualmente, Japón está reconstruyendo muchas de estas estructuras, pero persiste una pregunta crucial: ¿será posible construir muros lo suficientemente altos y resistentes como para enfrentar no solo tsunamis extremos como el de 2011, sino también los efectos crecientes del cambio climático, como el aumento del nivel del mar?

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. Analiza el nivel de preparación de Japón ante el riesgo de tsunamis, tomando en cuenta los logros y limitaciones en la predicción del tsunami de Tohoku en 2011.

2. Analiza los factores que llevaron la comunidad científica y la población japonesa a subestimar el riesgo de un tsunami tan grande como el de 2011.

3. ¿Con qué otros peligros se relaciona el tsunami de 2011?

4. Analiza los errores humanos que, antes y después del tsunami de 2011, contribuyeron a convertir ese evento en una catástrofe.

5. ¿Qué estrategias podrían implementarse en Japón para minimizar las consecuencias de futuros tsunamis?

Caso 5

El tsunami del Océano Índico de 2004: lecciones de una tragedia global

Antes del 26 de diciembre de 2004, pocas personas conocían el significado de la palabra japonesa “tsunami”. Eso cambió drásticamente en unas cuantas horas, cuando cerca de 230,000 personas perdieron la vida, cientos de miles resultaron heridas y millones fueron desplazadas en más de una docena de países alrededor del Océano Índico. Sin un sistema de alerta en funcionamiento, las comunidades costeras de esta región fueron impactadas una tras otra por una serie de olas de tsunami, sin previo aviso.

Este tsunami, el más letal del que se tiene registro histórico, fue provocado por el terremoto más grande detectado en el mundo en las últimas cuatro décadas, ocurrido la mañana del 26 de diciembre de 2004 frente a la costa occidental de la isla de Sumatra, Indonesia (Figura 1). El sismo, al cual se ha asignado una magnitud de al menos 9.1, se produjo en correspondencia de la zona de subducción de las placas Índica y Australiana bajo la microplaca de Birmania. Durante este evento, la microplaca de Birmania se desplazó unos 20 metros hacia el oeste-suroeste, liberando ondas sísmicas que provocaron varios minutos de intensas vibraciones en las islas cercanas (Figura 2). La ruptura se extendió por más de 1,500 kilómetros a lo largo de la zona de subducción, elevando verticalmente el fondo marino de varios metros y desplazando una enorme masa de agua que generó el tsunami (Figura 3).

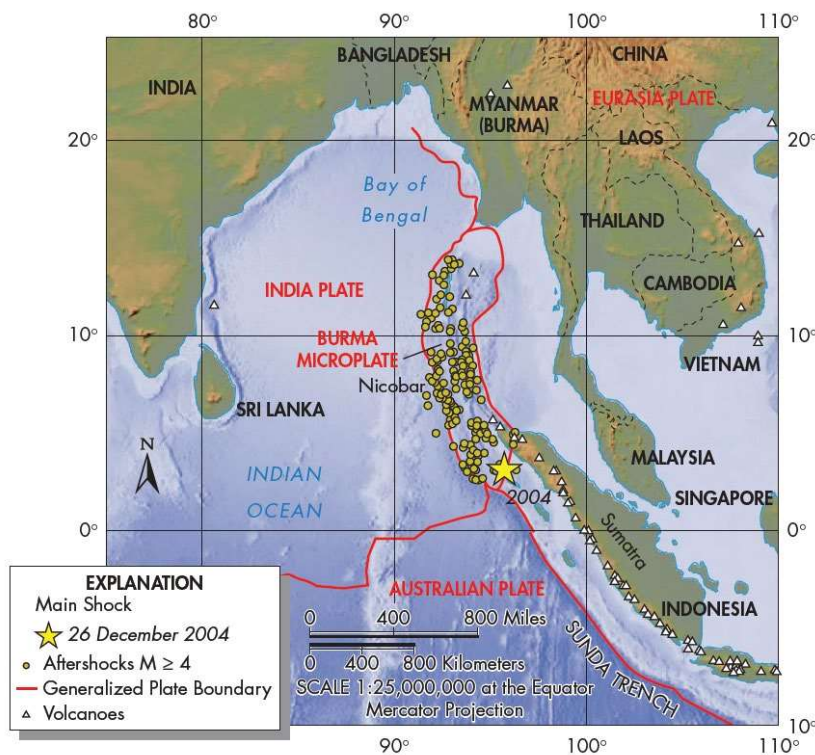


Figura 1. Contexto tectónico de Indonesia. La estrella amarilla indica el epicentro del sismo de magnitud 9.1 que ocurrió el 26 de diciembre de 2004. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

A diferencia del Océano Pacífico, el Índico carecía de un sistema de alerta de tsunamis, por lo que la mayoría de las personas fueron tomadas por sorpresa. Aunque los científicos del Centro de Alerta de Tsunamis del Pacífico en Hawái reconocieron que el terremoto podía desencadenar un tsunami, en ese momento no contaban con las técnicas geofísicas necesarias para calcular con precisión la magnitud de un evento de tal escala. Intentaron alertar al Departamento de Estado de los Estados Unidos para que

transmitieran la preocupación a los países de la región; sin embargo, las advertencias no llegaron a tiempo e, incluso si hubieran llegado, no existía un sistema capaz de informar directamente a las comunidades costeras. Si las advertencias hubieran llegado a tiempo, se habrían podido salvar decenas de miles de vidas, ya que el tsunami tardó horas en alcanzar algunas de las regiones más severamente impactadas.

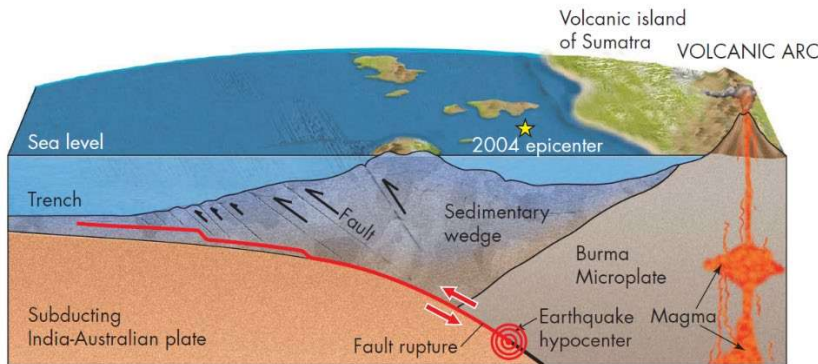


Figura 2. Sección esquemática de la zona de subducción de Sumatra en la que se observa la ruptura que provocó el sismo de 2004 (línea roja). Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

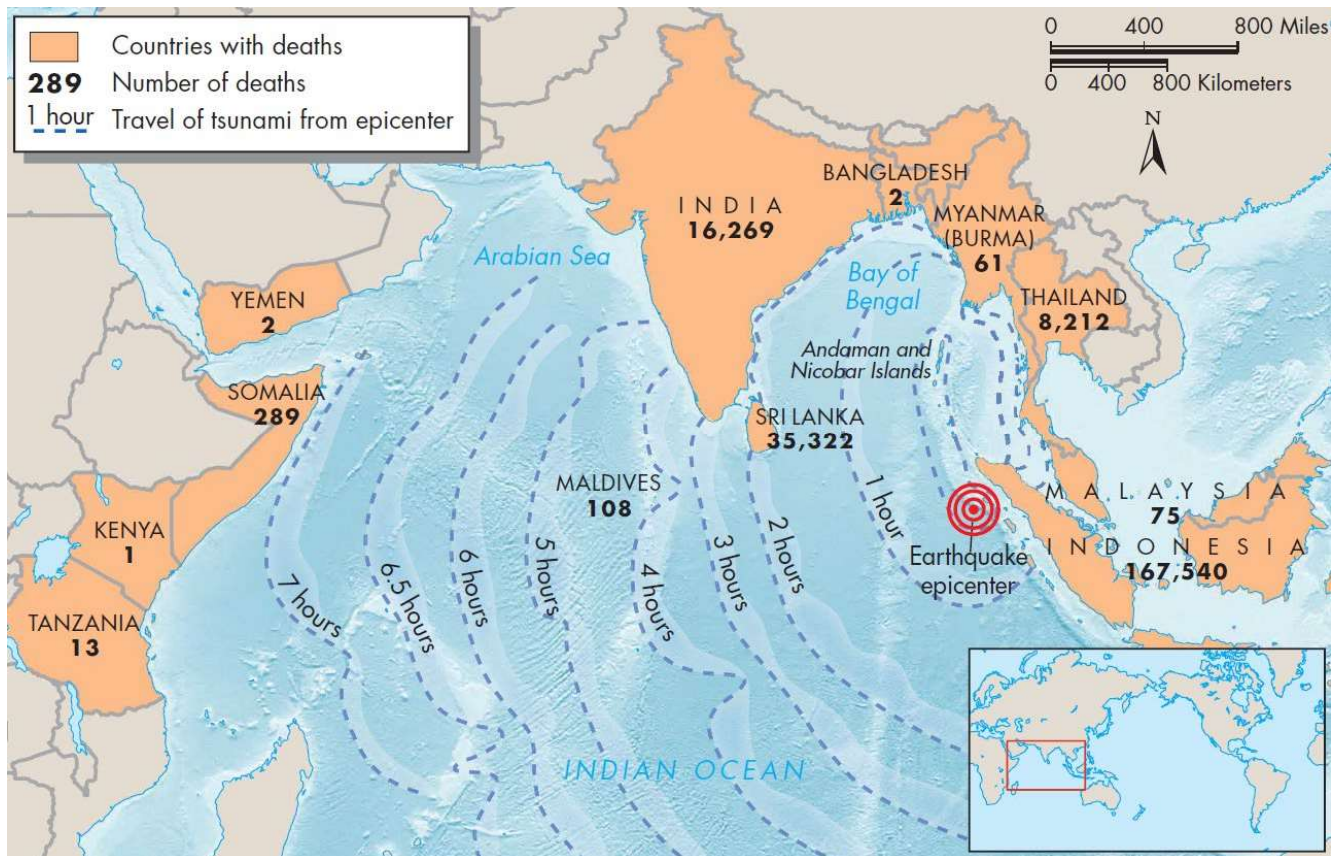


Figura 3. El mapa muestra la trayectoria del tsunami generado por el sismo de magnitud 9.1 ocurrido el 26 de diciembre de 2004 frente a la costa occidental de Sumatra, Indonesia. Las líneas azules discontinuas señalan la posición de la ola principal del tsunami en intervalos de una hora tras el sismo. Las olas tardaron cerca de siete horas en llegar a Somalia, en la costa oriental de África. La mayoría de las víctimas se registraron en Indonesia, donde la primera ola impactó en menos de una hora. El número de víctimas indicado en cada país incluye tanto las personas fallecidas como las desaparecidas. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

La mayoría de las muertes ocurrieron en Indonesia, que, en menos de una hora, experimentó tanto las intensas vibraciones sísmicas como las olas del tsunami. En Sri Lanka e India, donde también fallecieron miles de personas, las olas tardaron entre 90 minutos y 2 horas en llegar. En Somalia, ubicada en la costa oriental de África, el tsunami impactó después de más de 7 horas, dejando rastros de destrucción. La ciudad de Banda Aceh, en el extremo norte de Sumatra, quedó casi completamente destruida, tanto por el movimiento telúrico como por la fuerza de las olas y la inundación (Figura 4). Las zonas turísticas de la región sufrieron daños severos (Figura 5), especialmente en Tailandia (Figura 6), donde murieron varios miles de turistas que no estaban familiarizados con el fenómeno del tsunami: por ejemplo, en Phuket, las personas se paralizaron al ver la llegada de las olas, mientras que otras huyeron presas del pánico (Figura 7).

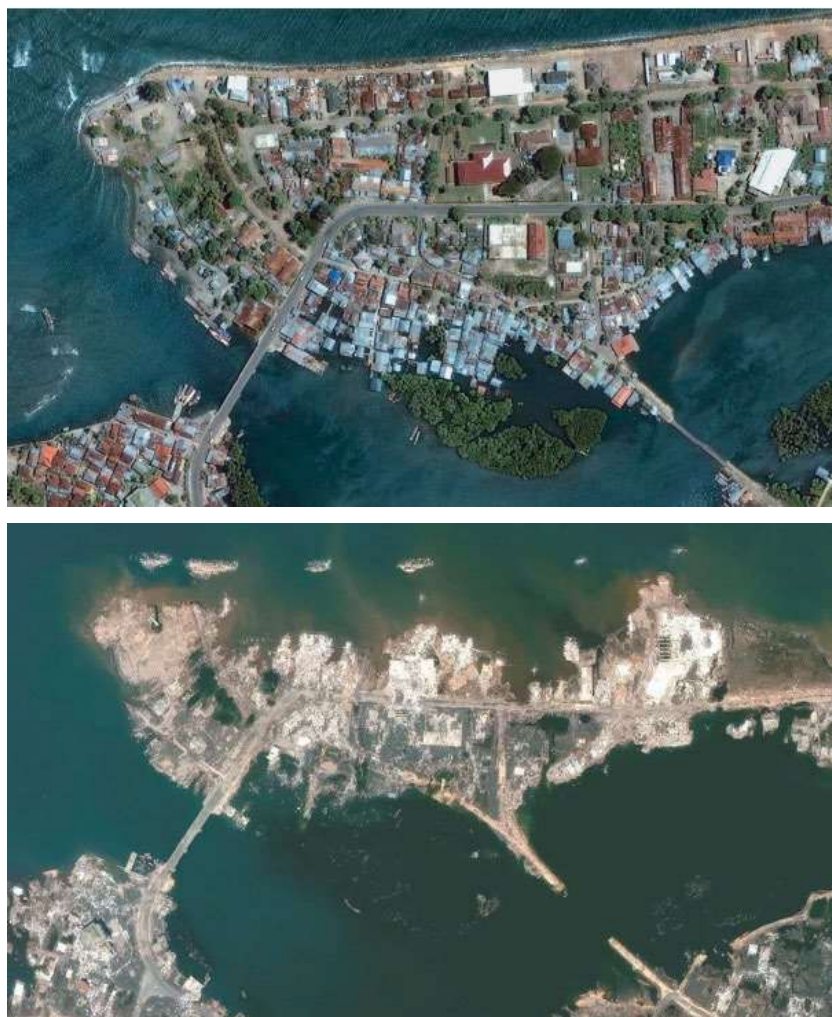


Figura 4. Imágenes satelitales de la ciudad de Banda Aceh, Sumatra, captadas antes (arriba) y dos días después (abajo) del terremoto y tsunami del 26 de diciembre de 2004. Gran parte del desarrollo urbano fue destruido, la línea costera retrocedió notablemente dejando solo algunos islotes, y extensas zonas de la ciudad quedaron inundadas debido a la subsidencia provocada por el sismo. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Sin embargo, en algunos lugares hubo quienes reconocieron las señales del tsunami y lograron salvarse. En Tailandia, una niña británica de 10 años que había aprendido sobre tsunamis en la escuela observó cómo el mar se retiraba y dio la alerta, logrando evacuar a unas 100 personas de una playa. Asimismo, al notar que, en 20 minutos, el nivel del mar había experimentado un descenso de hasta 7 metros, un científico en vacaciones en Sri Lanka alertó a los huéspedes de su hotel, la mayoría de los cuales tuvieron el tiempo de refugiarse en los pisos más altos antes de que llegaran las olas. En las islas Andamán y

Nicobar, los pueblos indígenas que conservaban una memoria colectiva sobre tsunamis buscaron refugio en las alturas justo después del sismo. En Khao Lak, Tailandia, fueron los elefantes quienes dieron la alarma: al percibir las vibraciones del suelo a más de 600 kilómetros de distancia del epicentro o, posiblemente, las ondas sonoras de baja frecuencia producidas por el sismo, los animales se dirigieron hacia terrenos elevados, salvando a los turistas que llevaban en el lomo.

Este evento demostró que la educación juega un papel crucial en la preparación ante desastres. Podrían haberse salvado miles de vidas si más personas hubieran reconocido las señales de la llegada del tsunami y se hubieran dirigido de inmediato a lugares elevados.



Figura 5. Algunos de los edificios más resistentes aguantaron la fuerza del tsunami, como la mezquita en la provincia de Aceh, Indonesia, que se muestra en la foto a la izquierda. La foto a la derecha muestra la localidad turística de Pangandaran, Indonesia, en donde la acumulación de enormes cantidades de escombros provocados por el tsunami dificultó la búsqueda de víctimas. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 6. Daños del tsunami en una aldea en las islas Kho Phi Phi, en Tailandia (https://www.nationalgeographic.com.es/medio-ambiente/el-tsunami-de-2004-en-el-indico-el-mas-devastador-de-la-historia_19081).

Desde 2004, en el Océano Índico se han instalado sistemas de alerta submarinos cuyos sensores permiten detectar las olas de un tsunami, y también se han colocado sirenas en las zonas costeras para alertar a la

población en caso de peligro. Adicionalmente, se han implementado programas para educar y preparar a la población ante estos fenómenos. En 2009, cuando un tsunami generado por un terremoto de magnitud 8.1 impactó Samoa Americana, Samoa y Tonga, las medidas preventivas y la concientización lograron reducir significativamente el número de víctimas, aunque aún hay margen para mejorar los sistemas de alerta y los procesos de evacuación.



Figura 7. El hombre en primer plano observa con incredulidad una ola del tsunami que se aproxima rápidamente a la costa en un complejo turístico en Phuket, Tailandia. Al principio, muchos residentes y turistas no creían que el agua los alcanzaría, pero, cuando vieron acercarse las olas, empezaron a correr. Algunas personas lograron ponerse a salvo, aunque la mayoría se ahogaron. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. ¿Qué tecnologías de monitoreo o alerta de tsunamis existían antes del tsunami del Océano Índico de 2004, y por qué no lograron prevenir la tragedia?

2. ¿Cómo influyeron el conocimiento y la percepción del riesgo (o su desconocimiento) en la reacción de las personas frente al tsunami de 2004?

3. ¿Cuál es la relación entre el tsunami y el terremoto ocurrido frente a Sumatra el 26 de diciembre de 2004?

4. ¿Cuáles errores humanos contribuyeron a agravar las consecuencias del tsunami de 2004?

5. Describe y evalúa las estrategias que se implementaron tras el evento de 2004 para reducir el impacto de futuros tsunamis en el Océano Índico.

Caso 6

La Conchita: dos deslizamientos (1995 y 2005) y un riesgo que persiste

La Conchita es una de tres pequeñas comunidades situadas a lo largo de una franja costera de 25 kilómetros entre Ventura y Carpintería, en la pintoresca costa de California, 80 kilómetros al noroeste de Los Ángeles (**Figura 1**). El desarrollo en esta zona es bastante limitado, ya que solo existen algunos espacios entre las montañas y el Océano Pacífico lo suficientemente amplios como para permitir la edificación. En muchos tramos, la franja costera apenas tiene el ancho suficiente para que la Autopista 101 siga el contorno del litoral. Para quienes transitan por la zona sin tener conocimientos geológicos, La Conchita podría parecer un lugar idílico para establecerse.

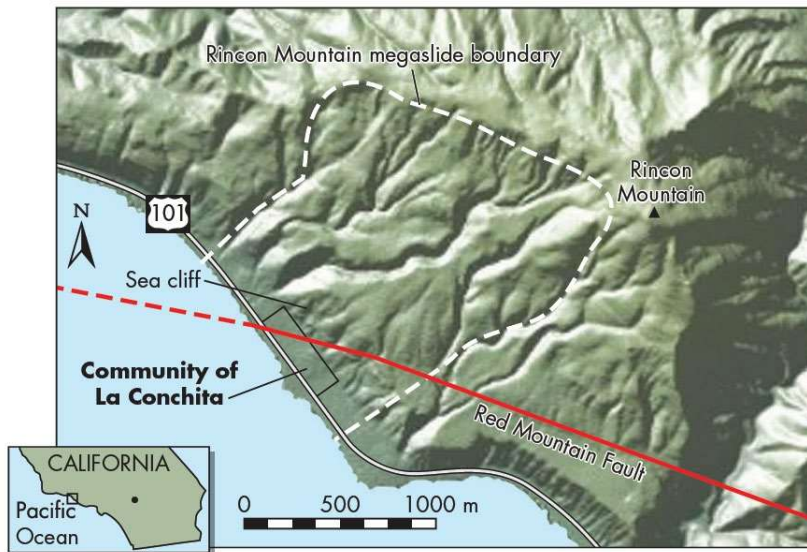


Figura 1. Ubicación de La Conchita y de importantes rasgos geológicos y topográficos, como el monte Rincón y la falla Red Mountain. La línea blanca discontinua muestra los límites aproximados del megadeslizamiento del monte Rincón. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

La topografía elevada de la región refleja un levantamiento tectónico activo. Uno de los picos más altos del sur de California, el monte Rincón, ha sido levantado por la falla inversa Red Mountain, que presenta tasas de deformación extremadamente altas y es también responsable del acantilado que se alza sobre La Conchita (**Figura 1**). Aproximadamente 250 metros por encima de la comunidad, se observan depósitos de playa no consolidados, que se formaron hace unos 40,000 años y desde entonces han sido levantados por el movimiento de la falla. Además del evidente peligro sísmico asociado a esta falla activa, su desplazamiento ha provocado una extensa fracturación en las rocas más antiguas que subyacen los depósitos de playa.

Al recorrer la Autopista 101, se observan las trazas de múltiples deslizamientos de tierra, algunos recientes, otros de hace unos miles de años, que ponen manifiesta la vulnerabilidad de la zona ante movimientos en masa (**Figura 2**). Además, es bastante común que la autopista se tenga que cerrar durante algunos días por la ocurrencia de flujos de lodo que bloquean la vía (**Figura 3**).

En el verano de 1994, se detectaron grietas en la parte superior de la ladera detrás de La Conchita. Esas grietas, que representaban una clara señal de movimiento, continuaron creciendo durante la temporada de lluvias y, para diciembre, habían empezado a canalizar agua hacia el subsuelo. Enero de 1995 fue un mes extraordinariamente lluvioso, ya que cayeron alrededor de 63 centímetros de lluvia contra el

promedio mensual de 10 centímetros. Febrero fue un mes relativamente seco; sin embargo, el 2 y 3 de marzo fueron días de precipitaciones intensas. El 4 de marzo de 1995, una masa de 1.3 millones de metros cúbicos de roca y tierra comenzó a deslizarse hacia La Conchita (**Figura 4**).

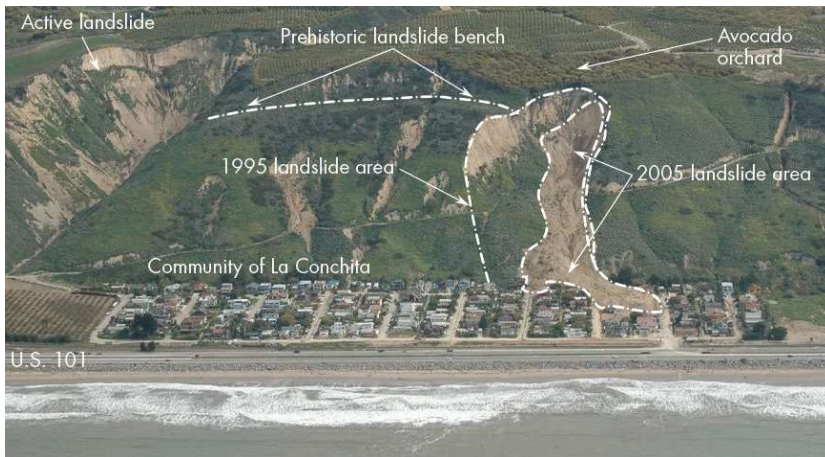


Figura 2. Fotografía de La Conchita que ilustra la ubicación de los deslizamientos antiguos y activos ubicados cerca de los deslizamientos de La Conchita de 1995 y 2005. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 3. Los flujos de escombros son comunes a lo largo de la zona costera, como este que ocurrió el mismo día del flujo de lodo que afectó el pueblo en 2005. Este flujo cubrió 500 m de la Autopista 101 al norte de La Conchita, rompió las barreras de concreto y alcanzó la playa. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El deslizamiento tardó varios minutos en descender por la ladera y alcanzar la comunidad. La mayor parte del material descendió como un bloque coherente, aunque en algunas zonas perdió cohesión y se comportó como un flujo de tierra (**Figura 5**). Se considera que las lluvias de marzo desestabilizaron el talud al sobresaturar el subsuelo que ya estaba saturado por las precipitaciones extraordinarias de enero. Cuando se detuvo, la masa tenía unos 120 metros de largo, cubría un área de más de 40,000 metros cuadrados y había destruido o dañado gravemente nueve viviendas. Afortunadamente, se había desplazado lo suficientemente lento como para permitir la evacuación de los residentes. El Condado de Ventura declaró inmediatamente el área como zona de peligro geológico e impuso restricciones a nuevas construcciones.

Después del evento, el condado encargó un estudio para evaluar el riesgo de futuros movimientos en masa y estimar el costo de estabilizar el acantilado. Una de las conclusiones clave del estudio fue que los deslizamientos son comunes en esta región, y que muchas casas se encuentran sobre depósitos de

deslizamientos de hasta 25 metros de espesor que se acumularon en los últimos 6,000 años. Investigaciones más recientes sugieren que el mismo monte Rincón podría formar parte de un megadeslizamiento ocurrido hace unos 20,000 años. Irónicamente, fueron los mismos deslizamientos los que formaron la franja de sedimentos sobre la que hoy se asienta La Conchita.

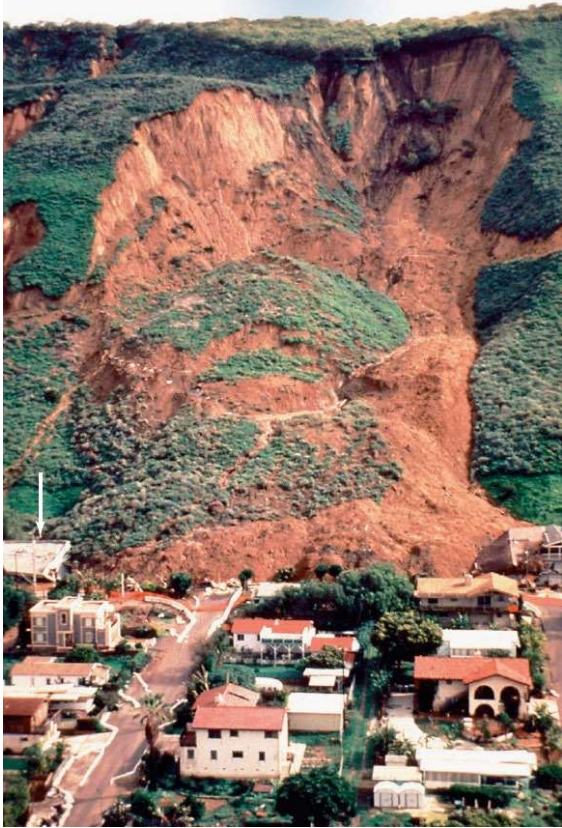


Figura 4. Vista aérea del deslizamiento de La Conchita de 1995, con parte de la comunidad en primer plano. La pared del acantilado está conformada en su mayoría por depósitos de deslizamientos y sedimentos más antiguos cerca de la cima, un gran bloque desplomado parcialmente cubierto de vegetación en el costado del talud, y depósitos de flujo de lodo en la base del talud. Este deslizamiento enterró, derrumbó o dañó las casas en la base de la ladera. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

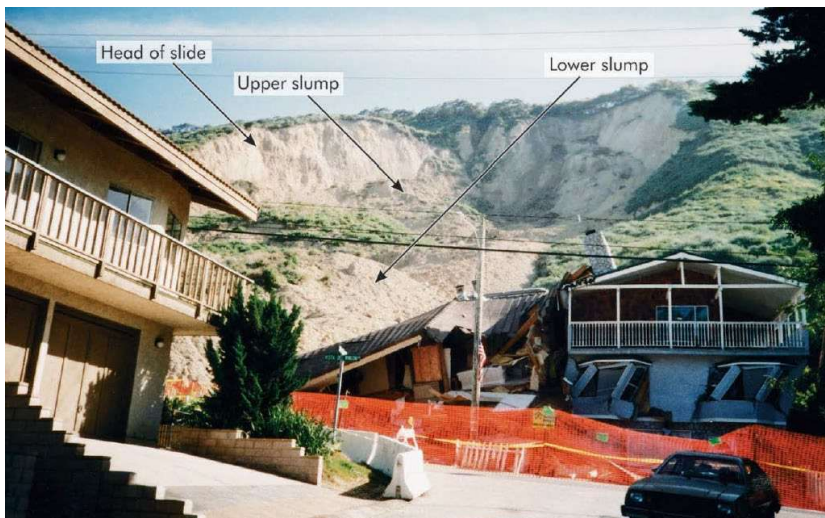


Figura 5. A lo lejos se aprecia la cicatriz semicircular del deslizamiento de 1995. El deslizamiento empezó como un desplome y luego se fluidificó, bajando como un flujo de tierra. Varias casas, incluyendo la de tres pisos que se aprecia atrás de la malla de plástico naranja, quedaron destruidas. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

El estudio también recomendó construir terrazas para reducir la pendiente del acantilado e instalar un elaborado sistema de drenaje, con un costo estimado en 150 millones de dólares. Sin embargo, debido al costo prohibitivo de la obra, se optó por implementar medidas más modestas, que incluían un sistema de

drenaje limitado y un muro de contención que solo ayudaría a detener pequeños flujos de lodo o los productos de la erosión superficial de la ladera (Figura 6). Además de que el muro no sería capaz de contener un deslizamiento mayor, para su construcción se tuvo que retirar parte de la base del talud, lo que probablemente debilitó aún más la ladera.



Figura 6. Este muro de contención fue construido después del deslizamiento de 1995 y fue instalado para evitar que el material suelto cubriera la carretera, pero no estaba diseñado para prevenir otro deslizamiento. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Entre 1995 y 2005, los residentes fueron avisados en varias ocasiones sobre el riesgo persistente de deslizamientos. Algunos se mudaron, mientras que otros se quedaron, ya fuera por decisión propia o por la devaluación de sus propiedades. Algunos percibieron que, tras el deslizamiento, el área era más segura, e incluso hubo quienes compraron nuevas viviendas. Sin embargo, la cuestión nunca fue si ocurriría otro deslizamiento, sino cuándo.

El deslizamiento de 2005 ocurrió el 10 de enero, tras quince días de lluvias casi récord en el sur de California. Ese mismo día, la Autopista 101 había sido cerrada por un flujo de escombros que había sepultado la carretera al noroeste de La Conchita. Mientras los medios documentaban ese evento, a las 12:30 p.m. el acantilado sobre La Conchita volvió a ceder. A diferencia del evento de 1995, este deslizamiento se desplazó rápidamente como un flujo de escombros y fue captado por las cámaras. Estaba compuesto en gran parte por material de la porción sureste del deslizamiento de 1995 (Figura 7). Aunque su volumen representaba apenas una quinta parte del deslizamiento anterior, el flujo de 2005 superó el muro de contención (Figura 8) y avanzó sobre la comunidad a una velocidad de 5 metros por segundo, destruyendo 13 casas y dañando gravemente otras 23 (Figura 9). Los residentes que se encontraban al aire libre lograron correr para salvarse, mientras quienes estaban adentro de sus casas no tuvieron oportunidad. Lamentablemente, diez personas murieron sepultadas.

Tras la tragedia, la comunidad de La Conchita se organizó para colaborar con las autoridades estatales en la búsqueda de soluciones efectivas. En marzo de 2006, el gobernador invirtió 600,000 dólares en la búsqueda de métodos eficaces que permitieran prevenir futuros movimientos en masa. Una demanda contra el Rancho La Conchita, que operaba un rancho de aguacates en la cima del acantilado, concluyó que la empresa fue responsable en un 50% del deslizamiento, por no haber garantizado un drenaje adecuado del terreno durante las lluvias previas. Aunque los tribunales reconocieron esta negligencia humana, también es evidente que el contexto geológico, la elección inicial del sitio en donde desarrollar la comunidad y las decisiones individuales de los residentes influyeron en la magnitud del desastre.

Un informe de 2010 estimó que proteger la mayoría de las viviendas de La Conchita costaría unos 50 millones de dólares. Sin embargo, hasta ahora, se ha hecho muy poco para estabilizar la ladera. Además, debido al riesgo de provocar nuevos movimientos al remover los escombros de 2005, estos permanecen en su lugar, recordando a diario a los residentes el peligro constante al que están expuestos. Hoy, quienes habitan en La Conchita lo hacen bajo su propia responsabilidad.



Figura 7. Vista aérea de la reactivación del deslizamiento de 1995 ocurrida en 2005. Se puede observar que el muro de contención que se había construido después del evento de 1995 quedó parcialmente enterrado y destruido. Al pie de la ladera, el deslizamiento ha formado dos flujos de tierra, uno más grande a la derecha y uno más chico hacia la izquierda. Lodo y escombros han cubierto las calles de la comunidad y dañado o sepultado alrededor de 30 casas. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 8. El muro de contención fue parcialmente destruido durante el flujo de lodo de 2005. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 9. El flujo de lodo de 2005 sepultó al menos 10 personas y dañó o destruyó alrededor de 30 casas. Mientras fluía adentro y arriba de las casas, la masa de lodo y escombros tenía la consistencia del concreto. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. ¿Qué evidencias se tenían sobre el peligro de movimientos en masa en la zona antes de los eventos desastrosos que afectaron La Conchita? ¿Cuáles fueron los eventos precursores de los deslizamientos de 1995 y 2005?

2. ¿Qué medidas se propusieron tras el evento de 1995 para reducir el riesgo de deslizamientos en La Conchita, y por qué no se implementaron?

3. ¿Qué otros peligros naturales están relacionados con el peligro de deslizamientos en La Conchita?

4. ¿Cuáles errores humanos contribuyeron a agravar las consecuencias del movimiento en masa de 2005 y por qué?

5. ¿Cómo se involucraron los residentes de La Conchita, el condado de Ventura y el gobierno estatal en los esfuerzos por minimizar las consecuencias de los movimientos en masa?

Caso 7

Cuando la tierra no se detiene: la historia del deslizamiento en Portuguese Bend, California

El deslizamiento de tierra en Portuguese Bend, una localidad ubicada en la costa sur de California, cerca de Los Ángeles, es un ejemplo emblemático de cómo las actividades humanas pueden incrementar el riesgo de movimientos en masa. Este evento, que destruyó más de 150 viviendas, forma parte de un antiguo deslizamiento de mayor tamaño que se reactivó en consecuencia a la construcción de una carretera y a modificaciones del drenaje subterráneo asociadas con el desarrollo urbano (Figura 1).

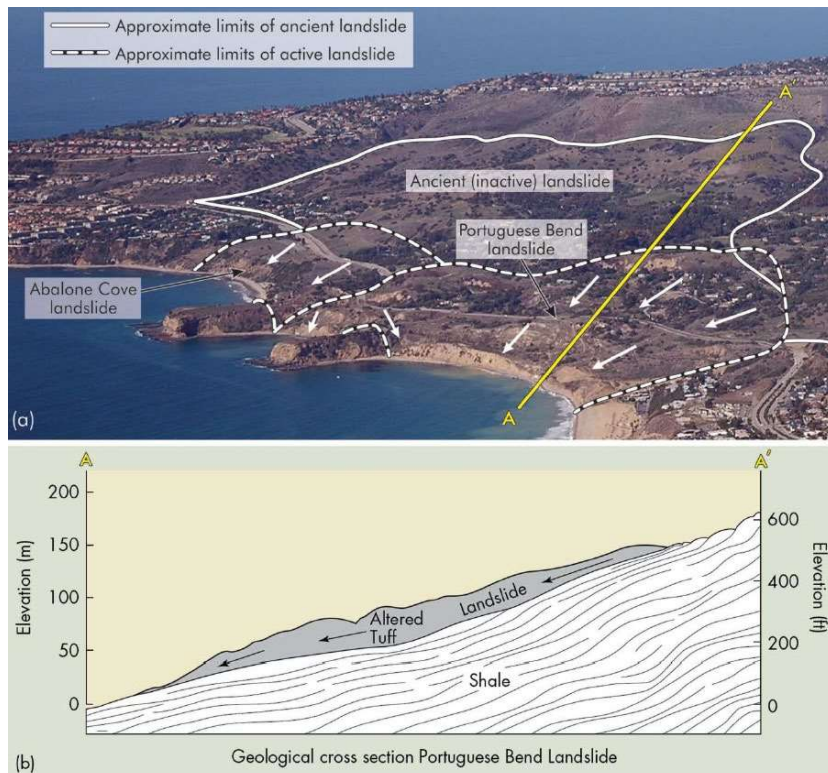


Figura 1. a) La fotografía muestra la extensión del antiguo deslizamiento, parte del cual se reactivó para generar el deslizamiento de Portuguese Bend en la década de 1950 y el deslizamiento de Abalone Cove en la de 1970. Las flechas indican la dirección del movimiento del deslizamiento hacia el océano Pacífico. b) Sección del lado derecho del deslizamiento de Portuguese Bend. El deslizamiento involucró una capa de cenizas volcánicas consolidadas alteradas a bentonita, un tipo de arcilla expansiva que se deforma con facilidad al ser sometida a un esfuerzo. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Las fotografías aéreas de la parte inferior del deslizamiento muestran claras evidencias de su reactivación (Figura 2): terrenos desprovistos de vegetación al oeste de la carretera, donde el movimiento reciente destruyó casas y caminos, así como la deformación del muelle provocada por el avance de la masa de tierra hacia el océano (con el paso del tiempo, tanto el muelle como el club de natación contiguo quedaron destruidos). La reactivación comenzó en 1956, cuando el condado de Los Ángeles, que sucesivamente fue declarado responsable de la desestabilización del talud, colocó un relleno de tierra sobre la parte alta del antiguo deslizamiento, donde planeaba construir una nueva autopista.

Entre 1956 y 1978, el deslizamiento mantuvo un movimiento continuo, con una velocidad promedio de entre 0.3 y 1.3 centímetros por día; en periodos particularmente lluviosos, la velocidad llegó a superar los 2.5 centímetros diarios. Las lluvias intensas también reactivaron otra sección más septentrional del antiguo deslizamiento, en Abalone Cove (Figura 1a). Este segundo episodio impulsó nuevas investigaciones geológicas, a raíz de las cuales, en 1980, se implementó un programa de control de

deslizamientos basado en la perforación de pozos y en el drenaje de los materiales saturados de agua. Para 1985, aparentemente se había logrado estabilizar el terreno, aunque su comportamiento futuro dependería de la intensidad de las precipitaciones y del efecto de las actividades humanas (irrigación, descarga de sistemas sépticos...) en la saturación del subsuelo.



Figura 2. La deformación del muelle, visible en la parte superior izquierda de la imagen, muestra los daños iniciales causados por el deslizamiento en Portuguese Bend. Con el tiempo, la mayoría de las casas que se ven en la imagen, así como el club de natación y el muelle, quedaron destruidos por el lento movimiento del terreno. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Durante el periodo de actividad del deslizamiento, las viviendas situadas sobre la zona afectada experimentaron un desplazamiento considerable: una casa llegó a moverse más de 25 metros de forma continua, mientras que otras se desplazaron hasta 50 metros, aunque no de manera constante. En general, las viviendas ubicadas en la zona activa debían ser ajustadas aproximadamente cada año mediante gatos hidráulicos. Además, las líneas de los servicios de agua, gas y electricidad tuvieron que ser instaladas sobre la superficie para evitar que se deformaran a medida que el terreno seguía desplazándose.

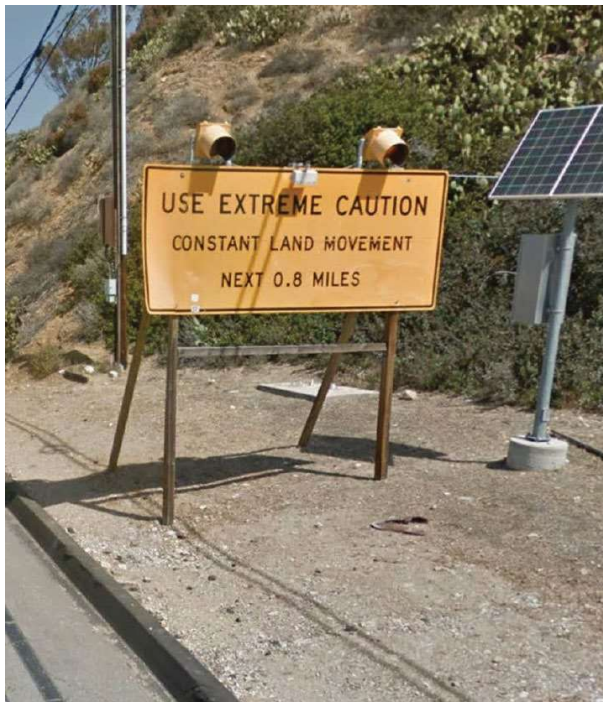


Figura 3. A pesar de que los mapas geológicos publicados en la década de 1940 indicaban que gran parte de Portuguese Bend correspondía a un deslizamiento de tierra, en la zona se construyeron casas, caminos y calles. La carretera Palos Verdes Drive South, que aparece en esta imagen, cruza el área del deslizamiento y requiere trabajos constantes de mantenimiento, ya que cada año se desplaza de varios metros hacia el océano. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Desde que se reactivó el deslizamiento, no se han construido nuevas viviendas en la zona. Los habitantes que aún permanecen han optado por adaptarse a la situación, en lugar de asumir la pérdida total de sus propiedades (**Figura 3**); no obstante, hoy en día son pocos los geólogos que estarían dispuestos a vivir en ese lugar.

A partir de 2021, el deslizamiento ha vuelto a acelerar, registrando desplazamientos mensuales de hasta 10 centímetros y provocando daños frecuentes a la infraestructura vial. Las autoridades locales están monitoreando de manera continua el desplazamiento de la masa de tierra con sensores GPS e interferometría satelital, así como el grado de saturación de agua, y están evaluando reforzar el terreno con anclajes y muros, además de mantener las restricciones en el uso del suelo.

La historia de los deslizamientos en Portuguese Bend enfatiza que la ciencia y la ingeniería pueden ayudarnos a comprender estos fenómenos y a detener temporalmente su avance. Sin embargo, identificar zonas de riesgo y limitar el desarrollo urbano en terrenos inestables son estrategias mucho más eficaces que mitigar el daño una vez que se haya permitido la edificación en zonas peligrosas.

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. ¿Qué métodos se han empleado para monitorear el deslizamiento en Portuguese Bend?

2. Tras la reactivación del deslizamiento, ¿cómo ha influido el conocimiento del riesgo sobre las decisiones tomadas por las autoridades y los habitantes?

3. ¿Qué relación existe entre la ocurrencia de precipitaciones intensas y la reactivación o aceleración del deslizamiento en Portuguese Bend?

4. ¿Cuáles acciones humanas han contribuido a reactivar el antiguo deslizamiento en Portuguese Bend?

5. Describe las estrategias que se han implementado en Portuguese Bend para mitigar los efectos del deslizamiento y reducir los daños.

Caso 8

El río Misisipi y sus crecidas (1973-2008): procesos naturales e intervención humana

En la primavera de 1973, las inundaciones del río Misisipi obligaron a evacuar a decenas de miles de personas, ya que miles de kilómetros cuadrados de tierras agrícolas quedaron bajo el agua. Afortunadamente, las pérdidas humanas fueron mínimas, pero los daños materiales se estimaron en aproximadamente 1,200 millones de dólares. Esto sucedió a pesar de las importantes inversiones en presas de control de inundaciones construidas aguas arriba en el río Misuri, el principal afluente del Misisipi. De hecho, los embalses de estas presas llegaron a inundar algunas de las tierras agrícolas más valiosas de los Dakotas y, aún con estas estructuras, la crecida del río cerca de San Luis, Misuri rompió récords históricos.

Por impactante que fue la inundación de 1973, no se compara con las que ocurrieron 20 y 35 años después. En 1993 y 2008, las tierras alrededor del Misisipi y sus tributarios enfrentaron dos de las inundaciones más graves registradas en los últimos siglos. La de 1993 fue provocada por tormentas que, entre abril y julio, descargaron alrededor de 90 centímetros de lluvia en la región de Cedar Rapids, Iowa. La inundación se prolongó desde finales de junio hasta principios de agosto, causando 50 muertes y más de 15,000 millones de dólares de daños a propiedades. En total, se inundaron 55,000 kilómetros cuadrados de terreno, incluidos numerosos poblados y tierras de cultivo. Las inundaciones de 2008 fueron provocadas por unas tormentas que comenzaron en invierno y se extendieron hasta finales de la primavera. En Indiana, en un solo día de junio, cayeron más de 25 centímetros de lluvia. Una vez más, las defensas contra inundaciones fallaron, provocando la muerte de 24 personas y daños por 9,000 millones de dólares.

En 1993, el nivel del agua se mantuvo elevado durante un periodo prolongado, lo que ejerció gran presión sobre los diques del Misisipi, unos terraplenes paralelos al río diseñados para contener sus aguas (Figuras 1 y 2). Antes de su construcción, la llanura de inundación del Misisipi era mucho más extensa y albergaba amplias zonas de humedales. Desde la edificación de los primeros diques en 1718, se ha perdido aproximadamente el 60% de los humedales en Wisconsin, Illinois, Iowa, Misuri y Minnesota, todos ellos gravemente afectados por la inundación de 1993.

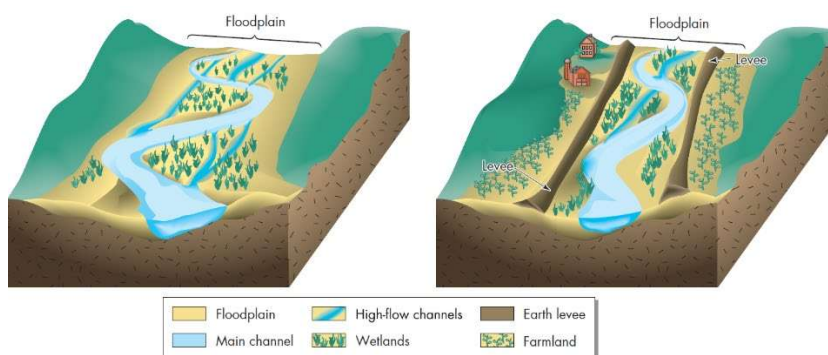


Figura 1. La imagen a la izquierda muestra una llanura de inundación natural, caracterizada por la presencia de extensos humedales, mientras a la derecha se muestra una planicie modificada por las actividades humanas: se ha construido un sistema de diques, acortado el canal del río, usado el suelo para actividades agrícolas, mientras que los humedales quedan confinados entre los diques. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

En zonas urbanas como San Luis, los diques han sido sustituidos por muros de contención diseñados para proteger la ciudad de crecidas mayores. Al pasar por San Luis, el río se estrecha debido a estos muros, mientras que río arriba, cerca de Alton, Illinois se ensancha. Este diseño crea un efecto “cuello de

botella” que obliga al agua a fluir por un canal angosto, lo cual provoca su acumulación mientras espera su paso. Este fenómeno contribuyó a la inundación de 1993 al norte de San Luis (Figura 3). En la ciudad, el nivel máximo del agua quedó a solo 60 centímetros de sobrepasar los muros. Conforme el nivel aumentaba, estos comenzaron a presentar filtraciones, por lo que fue necesario trabajar sin descanso para evitar su colapso. La ruptura de varios diques río abajo de San Luis (Figura 4) ayudó a disminuir la presión ejercida por el agua sobre los muros de contención, por lo que la ciudad se salvó de la inundación.

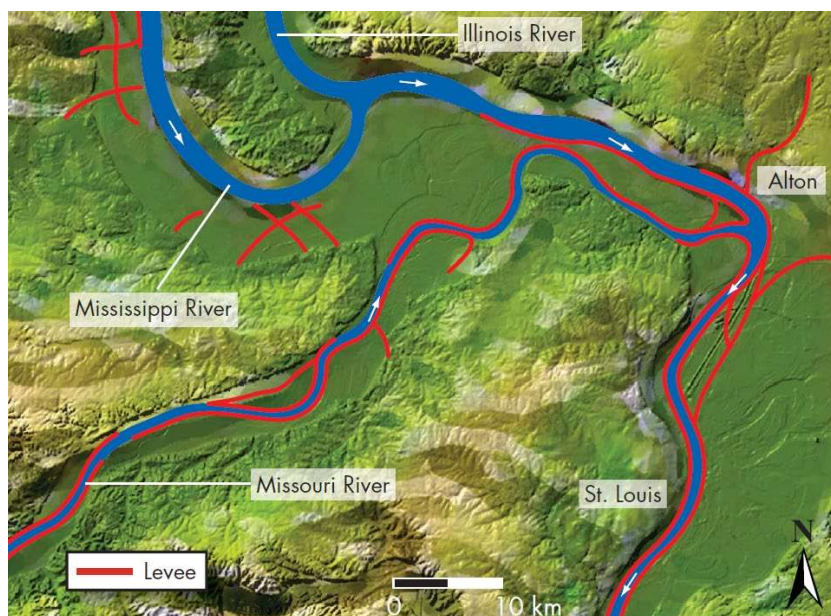


Figura 2. Cerca de las ciudades de Alton y San Luis, el río Misisipi queda casi completamente encerrado entre diques (líneas rojas). Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 3. La imagen de satélite muestra la extensión de la inundación de 1993 en la zona donde los ríos Illinois y Misuri confluyen con el Misisipi. Las aguas de la inundación de 1993 se muestran en rojo, mientras que el azul representa el flujo normal del río. En la parte inferior derecha de la imagen se puede observar que los muros de contención construidos para proteger San Luis estrechan el cauce del Misisipi: este efecto ha provocado inundaciones generalizadas río arriba, incluso en la ciudad de Alton, Illinois. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Construir casas, fábricas, edificios públicos y granjas en una llanura de inundación es, sin duda, una invitación al desastre. Muchas personas que habitan estas zonas se resisten a aceptar que la planicie forma parte del sistema natural del río. En realidad, estas áreas existen precisamente gracias a los procesos de

inundación. Si no se reconoce su función y su relación con el río, el control de inundaciones y el drenaje de la llanura pueden convertirse en temas críticos (Figura 5).



Figura 4. La ruptura de este dique en Illinois durante la inundación del río Misisipi en 1993 provocó el anegamiento del pueblo de Valmeyer. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 5. Daños a las tierras agrícolas durante el pico de la inundación del río Misisipi en 1993. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Una lección importante aprendida de las inundaciones de 1993 y 2008 es que la construcción de diques genera una falsa sensación de seguridad. La existencia de un dique no elimina el hecho de que un terreno se encuentra en una llanura de inundación, ni reduce el riesgo de manera definitiva. Además, es difícil

diseñar diques capaces de resistir inundaciones severas durante periodos prolongados. Su construcción también reduce el espacio disponible para que la planicie absorba el exceso de agua.

En Estados Unidos, desde mediados del siglo XX, tanto las inversiones en obras de control de inundaciones como los daños provocados por estos mismos fenómenos han crecido de manera exponencial. Esto se debe, al menos en parte, al calentamiento global, por efecto del cual los océanos más cálidos transfieren una mayor cantidad de energía a la atmósfera, intensificando la frecuencia y el volumen de las tormentas.

En los seis o siete años posteriores a la inundación de 1993, el gobierno federal adquirió muchos terrenos ubicados en la llanura de inundación al norte de San Luis con el objetivo de restituirlos al sistema fluvial. Sin embargo, los intereses inmobiliarios han revertido esa tendencia y los gobiernos locales han autorizado el desarrollo urbano en zonas que estén protegidas por diques, permitiendo la construcción de más de 25,000 nuevas viviendas en el área.

Afortunadamente, no todas las comunidades a lo largo del río han actuado de manera poco responsable: algunas han optado por reubicarse en terrenos más elevados, una medida que, sin duda, representa el tipo de ajuste más adecuado.

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. ¿Cuáles factores naturales pueden dificultar una predicción precisa de las crecidas del río Misisipi?

2. ¿Cómo ha influido el conocimiento del riesgo en la planificación urbana en la llanura de inundación del Misisipi?

3. ¿Qué papel juegan las tormentas y el cambio climático en las crecidas del Misisipi y sus inundaciones?

4. ¿En qué manera el desarrollo urbano en la llanura de inundación del río Misisipi ha contribuido a incrementar el riesgo de inundaciones y a agravar sus consecuencias?

5. ¿Qué estrategias se han implementado después de las grandes inundaciones del río Misisipi para minimizar las consecuencias de eventos futuros?

Caso 9

¿Por qué se inunda Houston? Lluvias extremas, expansión urbana y falta de prevención

Houston, la cuarta ciudad más grande de Estados Unidos, tiene una población de 6.5 millones de habitantes, distribuidos en un área de 1,500 kilómetros cuadrados. Aunque su ubicación tierra adentro la protege de las marejadas ciclónicas, la baja topografía y la presencia de numerosos arroyos que desembocan en el Golfo de México la hacen vulnerable a inundaciones severas cuando ocurren eventos de lluvias torrenciales.

En 2001, una inundación provocada por una tormenta tropical destruyó alrededor de 14,000 viviendas, cobró la vida de 23 personas y causó daños por 9,000 millones de dólares. En 2016, otra inundación causó la muerte de ocho personas y afectó alrededor de 1,000 viviendas.

En 2017, en tan solo dos días, el huracán Harvey descargó sobre Houston 125 centímetros de lluvia (más que el promedio anual de precipitaciones en la ciudad), provocando la inundación urbana más extensa y más grave de la historia de Estados Unidos (**Figura 1**). Este evento, clasificado como una inundación de 1,000 años, desplazó a un millón de personas, afectó alrededor de 200,000 viviendas y dañó cientos de miles de vehículos, provocando daños por 200,000 millones de dólares. Miles de personas fueron rescatadas en barcos o helicópteros y trasladadas a refugios de emergencia. La evacuación masiva no se consideró como una opción viable, ya que los embotellamientos habrían atrapado a muchas personas en las calles inundadas y esto podría haber incrementado el número de víctimas.



Figura 1. El evento de 2017 inundó carreteras y dañó miles de viviendas. Muchas personas fueron rescatadas con embarcaciones puestas a disposición tanto por los ciudadanos como por las autoridades del gobierno. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Se considera que el alto grado de impermeabilización del terreno es uno de los factores principales que aumentan la vulnerabilidad de Houston frente a las inundaciones. De hecho, más del 40% de la superficie de la ciudad está cubierta por edificios, calles, autopistas y estacionamientos que, al impedir la infiltración del agua hacia el subsuelo, hacen que las precipitaciones se descarguen por completo en la escorrentía superficial, incrementando el caudal de los canales y arroyos. A esto se suman el rápido crecimiento de la población, una planeación territorial deficiente que ha permitido el desarrollo en zonas inundables,

medidas preventivas. Un caso ejemplar es el del Centro Médico de Houston, que sufrió daños severos durante la inundación de 2001. A partir de esa experiencia, el Centro desarrolló un ambicioso proyecto de protección contra inundaciones que incluyó la instalación de 23 grandes compuertas y otras barreras. En 2017, estas medidas evitaron que el agua afectara sus instalaciones y garantizaron la continuidad de los servicios médicos para la población (Figura 3).



Figura 3. La instalación de barreras y puertas anti-inundación en el Centro Médico de Houston garantizó la continuidad de los servicios médicos para la población y permitió ahorrar millones de dólares en posibles daños. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Concientizar a la población para que se involucre activamente en la reducción del riesgo, por ejemplo, instalando barreras de protección en sus hogares o adquiriendo seguros contra inundaciones, es también una acción clave. De hecho, aunque es importante que el gobierno siga invirtiendo en obras de prevención, los propietarios son quienes enfrentan directamente las consecuencias de las inundaciones y deben estar preparados para proteger sus bienes y sus vidas.

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
 - Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
 - Los peligros naturales están interconectados.
 - Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
 - Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.
1. Por lo general, si se cuenta con pronósticos meteorológicos precisos y sistemas de monitoreo de las corrientes de agua, las inundaciones se pueden predecir. ¿Consideras que la inundación de Houston podría haberse anticipado?

2. Analiza el riesgo de inundaciones en Houston antes y después del evento de 2017, tomando en cuenta lo que se conoce sobre la probabilidad de ocurrencia de inundaciones.

This image shows a single sheet of white paper with horizontal blue or grey ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are approximately 20 lines visible. The paper has a slight shadow on the right side, suggesting it's resting on a surface.

3. ¿Qué otros peligros naturales estuvieron relacionados con la inundación de Houston de 2017?

4. ¿Cuáles acciones y decisiones humanas contribuyeron a agravar las consecuencias de la inundación de Houston de 2017?

[illegible]

5. ¿Qué recomendaciones harías para ayudar a minimizar las consecuencias de futuras inundaciones en Houston?

[illegible]

Caso 10

La Isla Folly: dinámica costera, erosión y manejo del riesgo geológico

La Isla Folly, ubicada 11 kilómetros al sur de Charleston, en Carolina del Sur, es una típica isla barrera de la costa atlántica de Estados Unidos (Figura 1). Con 10 kilómetros de largo, menos de 1 kilómetro de ancho y una elevación promedio de 1.5 a 3 metros sobre el nivel del mar, la isla se formó hace aproximadamente 4,500 años por la acumulación de cordones de dunas de arena que se depositaron en respuesta a una reducción del nivel del mar. Actualmente, la isla tiene alrededor de 3,000 habitantes.



Figura 1. La Isla Folly es una isla barrera situada al sur del puerto de Charleston, en Carolina del Sur. Su tamaño se está reduciendo progresivamente, en parte debido a la presencia de dos barreras que, aunque cumplen su función de mantener la entrada al puerto de Charleston libre de arena, también están bloqueando el aporte de nueva arena a las playas de la isla. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Las islas barrera actúan como una protección natural frente a las olas del océano, evitando que el continente reciba su impacto directo. Sin embargo, esto las hace extremadamente vulnerables a la erosión costera. En el caso de la Isla Folly, la erosión ha sido particularmente intensa: algunas playas retroceden entre 30 y 100 centímetros por año, mientras que ciertos tramos de la línea de costa se han estado retirando durante más de un siglo a velocidades de hasta 2 metros por año.

La erosión costera en la Isla Folly es el resultado de una combinación de procesos tanto naturales (por ejemplo, los huracanes; Figura 2) como provocados por el ser humano. Un factor clave fue la construcción, en 1896, de dos barreras rocosas perpendiculares a la costa por parte del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (Figura 1). Estas estructuras, que se ubican 7 kilómetros al noreste de la Isla Folly y se extienden 5 kilómetros mar adentro desde la entrada al puerto de Charleston, fueron diseñadas para evitar que esta se obstruyera con la arena que las corrientes oceánicas acarreaban hacia el sur. Aunque las barreras lograron su objetivo, también interrumpieron el transporte del sedimento, alterando el equilibrio natural entre el aporte de nueva arena y la erosión. Los efectos de este desequilibrio, combinados con el aumento del nivel del mar, han creado el serio problema de la erosión costera en la Isla Folly.

Desde mediados del siglo XX se han implementado diversas medidas para tratar de solucionar el problema. Por ejemplo, entre 1949 y 1970, se construyeron 40 rompeolas de madera perpendiculares a

la costa (Figura 3), así como muros de contención paralelos a la misma. Estas estructuras favorecieron la acumulación de arena corriente arriba; sin embargo, también causaron una erosión acelerada corriente abajo.



Figura 2. Erosión extensa de la costa de la Isla Folly provocada por el paso de los huracanes Irene y Sandy en 2011. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 3. Los rompeolas de madera contruidos perpendicularmente a la costa favorecen la deposición de arena corriente arriba, pero también aceleran la erosión costera corriente abajo. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Por su parte, los propietarios de viviendas han construido muros de concreto, roca o madera paralelos a la playa, o añadido arena frente a sus hogares, para protegerlas de la erosión y las inundaciones (Figura 4). Si bien estos muros proporcionaron una protección temporal, en muchos casos llevaron a exacerbar el proceso erosivo al amplificar los efectos de las olas de tempestad. Un caso notable ocurrió en 1985, cuando se autorizó la construcción de un hotel de nueve pisos en la costa con la condición de que se construyera un muro para protegerlo. Lamentablemente, el muro provocó una intensa erosión de la playa, y tampoco logró proteger el hotel de la marejada ciclónica del huracán Hugo en 1989. Desde entonces, se han implementado nuevas regulaciones estatales para limitar la construcción de tales estructuras contra la erosión costera.

En 1979, los habitantes de la isla demandaron al Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos por los daños derivados de las barreras de Charleston. En 1987, el gobierno federal aceptó cubrir la mayoría de los costos necesarios para estabilizar las playas de Folly por un periodo de 50 años y, en 2024, las

autoridades locales y federales renovaron este compromiso mediante un nuevo acuerdo de 50 años. Desde entonces, para mitigar los efectos de la erosión, se ha implementado el método del relleno artificial de playas, es decir, la adición periódica de arena a las playas (Figura 5). Este proceso se ha llevado a cabo en 1993, 2005, 2007, 2014, 2018 y 2024, costando a la fecha más de 90 millones de dólares. A pesar de estos esfuerzos, la arena añadida a menudo se pierde rápidamente, ya sea por la erosión continua o por la ocurrencia de eventos meteorológicos extremos. Por ejemplo, el huracán Joaquín, que azotó la isla en octubre de 2015, arrasó cerca de un tercio de la arena colocada en 2014.



Figura 4. Para proteger sus casas de las tormentas y la erosión costera, los habitantes de la Isla Folly construyen muros de contención usando madera y grandes bloques de roca, y elevan sus viviendas sobre pilotes. En el largo plazo, estas medidas de protección también contribuyen a la erosión de la playa. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).



Figura 5. Para llevar a cabo el relleno artificial de las playas de la Isla Folly, se utiliza una draga hidráulica que succiona arena de la plataforma continental y la bombea hacia la costa. La mezcla de agua y arena es transportada a través de tuberías de acero, como la que se observa en primer plano en la foto a la izquierda, y una vez descargada en la playa, es nivelada y distribuida con un buldócer. Tomada de Keller y DeVecchio (2019).

Los geólogos, que estudian el comportamiento de la línea de costa tomando en cuenta tanto el movimiento natural de la isla barrera como el ascenso del nivel del mar, han observado que las playas no están desapareciendo, sino cambiando de posición, lo cual sigue representando un serio problema para la población y la infraestructura de la isla. El aumento del nivel del mar, que en Charleston está ocurriendo

a una tasa de 3 milímetros por año, está desplazando la deposición de arena hacia el oeste, en dirección al continente, exacerbando la erosión costera incluso en ausencia de muros u otras estructuras artificiales. Esto implica que, aun sin intervención humana directa, los procesos naturales están contribuyendo a la erosión en la Isla Folly.

La Ley de Gestión del Litoral de Carolina del Sur de 1990 reconoce el riesgo que representa la erosión costera y establece distancias mínimas desde la línea de costa para la construcción. Sin embargo, el poblado de Folly Beach está exento de esta normativa, ya que su desarrollo urbano comenzó en la década de 1920. Lo que aún no se ha abordado de manera adecuada es el impacto del aumento del nivel del mar. De hecho, aunque las nuevas viviendas se construyen sobre pilotes (Figura 6), la altura de estas estructuras se determina a partir de mapas de riesgo de inundaciones que no contemplan el incremento del nivel del mar que probablemente ocurrirá durante su vida útil (Figura 7).



Figura 6. Con base en los mapas de riesgo de inundaciones elaborados en 2004, las nuevas viviendas en la Isla Folly se están construyendo sobre pilotes a una altura de 5 a 7 m sobre el nivel del mar. Sin embargo, considerando la continua erosión costera y el aumento del nivel del mar, esta elevación podría no ser suficiente para garantizar protección en caso de futuras marejadas ciclónicas. Imagen tomada de Keller y DeVecchio (2019).

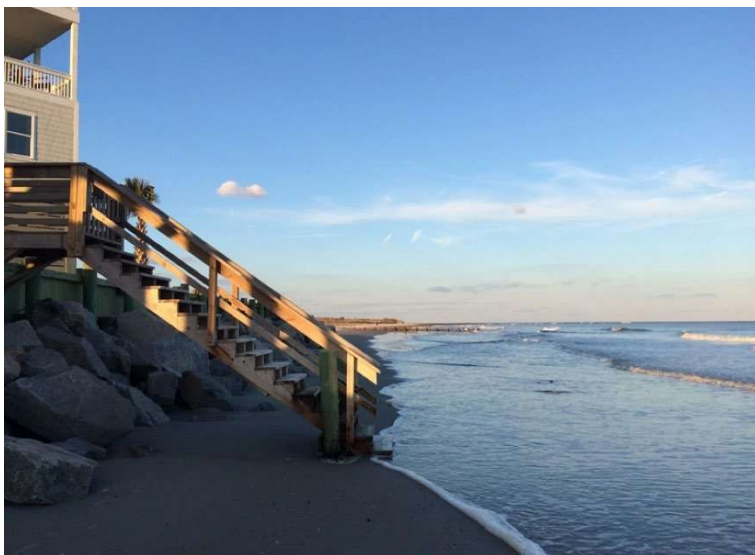


Figura 7. Debido a la erosión costera en la Isla Folly, las olas han alcanzado la entrada de esta casa (<https://www.southcarolinapublicradio.org/2016-03-28/folly-beach-deals-with-flood-related-beach-erosion>).

El reto para la Isla Folly, y para gran parte de las zonas costeras del Océano Atlántico y del Golfo de México, será adoptar políticas y regulaciones de manejo costero con visión de futuro, que tomen en cuenta la erosión costera, el aumento del nivel del mar y la subsidencia local. En algunos casos, será necesario decidir entre preservar las playas o proteger las construcciones e infraestructuras existentes.

Análisis y evaluación del caso

Lleva a cabo un análisis del caso, basándote en los cinco conceptos fundamentales que permiten comprender los peligros naturales:

- La ciencia nos ayuda a predecir los peligros naturales.
- Conocer los riesgos asociados a un fenómeno natural ayuda a tomar decisiones informadas.
- Los peligros naturales están interconectados.
- Las acciones humanas pueden convertir eventos naturales desastrosos en catástrofes.
- Es posible minimizar las consecuencias de los peligros naturales.

1. ¿Qué métodos se utilizan para monitorear la erosión costera en la Isla Folly?

2. ¿Cómo ha influido el conocimiento del riesgo asociado a la erosión costera y al aumento del nivel del mar en las decisiones sobre la protección costera y la planificación urbana en la Isla Folly?

3. ¿Cuál es la relación entre la erosión costera de la Isla Folly y otros peligros, como tormentas, huracanes y el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático?

4. ¿Qué impacto han tenido las acciones humanas en la erosión costera de la Isla Folly?

5. ¿Qué estrategias podrían implementarse para minimizar el impacto de la erosión costera en la Isla Folly?

RESPUESTAS

Caso 1

La erupción del volcán Eyjafjallajökull en 2010: preparación local y efectos globales

1. ¿Cómo se monitorea la actividad volcánica de Eyjafjallajökull y Katla? ¿Qué tipo de datos colectados entre enero y abril de 2010 permitieron anticipar la erupción de Eyjafjallajökull?

La actividad de los dos volcanes se monitorea a través de 56 estaciones sísmicas y 70 estaciones GPS que registran de manera continua la actividad sísmica y la deformación del terreno. Entre enero y abril de 2010, se registró un incremento progresivo de la sismicidad, que se fue haciendo más superficial con el tiempo, así como un levantamiento del terreno de hasta 5 milímetros por día. Al indicar que el magma se estaba abriendo camino hacia niveles corticales someros, estos datos permitieron anticipar la erupción.

2. ¿Por qué, antes de 2010, Eyjafjallajökull se consideraba un volcán menos peligroso respecto a Katla, y cómo ha cambiado esta percepción después de la erupción de 2010?

Antes de 2010, Eyjafjallajökull se consideraba un volcán de bajo riesgo, debido a su escasa actividad eruptiva (solo dos erupciones registradas en el último milenio) y al carácter predominantemente efusivo de sus erupciones. En cambio, Katla se percibía como una amenaza mayor, tanto por su historial eruptivo más frecuente (veinte erupciones documentadas en el mismo periodo), como porque está cubierto por un extenso casquete glaciar que fomenta las interacciones explosivas entre magma y hielo. La erupción de Eyjafjallajökull en 2010 demostró que un volcán “de bajo riesgo” puede tener un impacto global: de hecho, la extensa nube de ceniza que se levantó durante la fase explosiva de la erupción interrumpió el tráfico aéreo en gran parte de Europa durante varias semanas, afectando a millones de personas y ocasionando importantes pérdidas económicas.

3. Además de la caída de ceniza y los flujos de lava, la erupción de Eyjafjallajökull en 2010 ha impulsado la ocurrencia de otros fenómenos peligrosos, como los jökulhlaups. Explica qué son y cómo se generan estos peligros, e indica cuáles son las áreas geográficas que podrían verse más afectadas.

Los jökulhlaups son inundaciones provocadas por el rápido derretimiento del hielo glaciar cuando este entra en contacto con el magma. Las zonas más expuestas a este tipo de peligro son las que se encuentran pendiente abajo del glaciar, especialmente en los valles que canalizan las aguas de deshielo.

4. La baja densidad de población de Islandia y el entorno rural del volcán limitaron los efectos potencialmente catastróficos de la erupción de Eyjafjallajökull en 2010. ¿Qué podría haber ocurrido si al pie del volcán hubiera habido una ciudad?

La presencia de una ciudad al pie del volcán habría agravado el impacto local de la erupción por varias razones: evacuar a la población habría sido logísticamente más complicado; la caída de ceniza habría afectado severamente el tráfico vial y provocado el colapso de techos y otras estructuras; además, la exposición prolongada a la ceniza hubiera podido provocar graves daños a la salud de las personas.

5. Analiza el nivel de preparación del gobierno y de la población de Islandia frente a la erupción de Eyjafjallajökull en 2010: ¿qué tan eficaces fueron el monitoreo científico, el plan de evacuación y las medidas ingenieriles para la reducción del riesgo?

El gobierno y la población de Islandia demostraron un alto nivel de preparación frente a la erupción de 2010. De hecho, el monitoreo científico permitió detectar el ascenso del magma como una clara señal de la erupción inminente. Si bien algunas indicaciones resultaron contradictorias (hubo confusión respecto a si el ganado debía mantenerse encerrado o liberarse), los planes de evacuación fueron exitosos, ya que permitieron llevar a salvo la población en riesgo. Finalmente, las estructuras de control de inundaciones lograron minimizar el impacto de los jökulhlaups sobre la población, las propiedades y la infraestructura.

Caso 2

El terremoto de 2015 en Gorkha, Nepal: el pronóstico de una catástrofe

1. Antes del evento de 2015, ¿qué evidencias y conocimientos científicos permitieron anticipar que un sismo de gran magnitud afectaría Katmandú en el corto plazo?

La evidencia que permitió anticipar la ocurrencia de un sismo como el de 2015 fue que, a pesar de la convergencia activa entre las placas tectónicas, entre 1505 y 1866 no se registraron grandes terremotos en el segmento de falla al noroeste de Katmandú, por lo que en ese periodo debió de haberse acumulado una gran cantidad de energía elástica: eso implicaba que, en algún momento, toda esa tensión se tendría que liberar.

2. A partir del conocimiento del riesgo sísmico en la región, ¿qué acciones podrían haberse implementado en Nepal antes del terremoto de 2015 para reducir su impacto?

Al conocerse el riesgo sísmico, deberían haberse establecido códigos más estrictos de construcción antisísmica para los nuevos edificios, y reforzado los edificios existentes más vulnerables. Asimismo, debería haberse restringido el desarrollo urbano en áreas susceptibles a movimientos en masa, como las laderas empinadas que rodean el valle de Katmandú. También habría sido importante organizar campañas de concientización sobre el riesgo sísmico y entrenar a la población para que supiera cómo responder prontamente ante una emergencia sísmica.

3. ¿Qué otros peligros naturales se desencadenaron a partir del terremoto de Gorkha de 2015?

El terremoto de Gorkha provocó numerosos deslizamientos de tierra en las laderas empinadas alrededor del valle de Katmandú; incluso en el monte Everest, a 20 km de distancia del epicentro, una avalancha cobró la vida de 21 personas.

4. ¿Cuáles errores humanos contribuyeron a agravar las consecuencias del terremoto de Gorkha de 2015?

El no haber implementado regulaciones estrictas en materia de construcción antisísmica, por más que se tuviera conocimiento del riesgo sísmico, cobró la vida de miles de personas que fallecieron por el colapso de edificios. Otro grave error humano fue la falta de planeación territorial, por efecto de la cual varias comunidades que se habían establecido en laderas inestables fueron afectadas por los deslizamientos impulsados por el sismo.

5. Tras el terremoto de Gorkha de 2015, ¿qué medidas podrían haberse implementado en Nepal para reducir el impacto de futuros eventos sísmicos?

Tras el evento de 2015, debería haberse asegurado un aprovechamiento eficiente de la ayuda internacional, priorizando las comunidades más vulnerables. Con el fin de atacar los dos principales problemas que contribuyeron a agravar las consecuencias del sismo de 2015, esos fondos deberían haberse aprovechado para llevar a cabo la reconstrucción de Katmandú siguiendo altos estándares de seguridad antisísmica, e implementar una estrategia más efectiva de uso del suelo, restringiendo el desarrollo en las áreas de mayor riesgo.

Caso 3

De Kobe 1995 a Tohoku 2011: lecciones de dos terremotos para la prevención y mitigación de desastres

1. Analiza los éxitos y las limitaciones de Japón en la predicción del sismo de Tohoku de 2011.
Al contar con un extenso registro de los terremotos ocurridos en la región y una sofisticada red de sismómetros, los sismólogos habían estimado una alta probabilidad de ocurrencia de sismos de magnitud 7, por lo que el terremoto de magnitud 7.2 que precedió al evento mayor no resultó inesperado. Por otra parte, el terremoto de magnitud 9.0 no pudo anticiparse, debido a que, al no haber evidencia de eventos similares en la historia de la región, su probabilidad de ocurrencia no había sido considerada. A pesar de esta grave limitación, la red de sismómetros emitió una alerta apenas 8 segundos después del inicio del sismo, lo cual representó un importante logro técnico en términos de detección temprana.
2. ¿Cómo ha influido el conocimiento del riesgo sísmico sobre las decisiones tomadas por el gobierno japonés antes y después del terremoto de 2011?
Los aprendizajes derivados de la experiencia del terremoto de Kobe llevaron a Japón a tomar medidas para la reducción del riesgo, como el reforzamiento de edificios, la expansión de la red sísmica, la optimización del sistema de alerta temprana y la educación de la población sobre protocolos de respuesta ante sismos. Después del terremoto de 2011, los daños provocados por la licuefacción impulsaron al país a reevaluar las normativas de construcción en terrenos susceptibles a este fenómeno.
3. ¿Qué otros peligros naturales se desencadenaron a partir del terremoto de Tohoku de 2011?
El terremoto de Tohoku de 2011 desencadenó múltiples peligros naturales. Entre ellos, el más devastador fue un tsunami generado por el desplazamiento vertical del fondo marino en respuesta al movimiento de la placa Pacífica, que cobró la vida de 15,000 personas. Por otra parte, se produjeron miles de réplicas, algunas con magnitudes superiores a 7, cuyas vibraciones pudieron contribuir a los daños estructurales. Las vibraciones sísmicas también provocaron alrededor de 4,000 movimientos en masa en zonas montañosas, que causaron la muerte de varias personas. Finalmente, el paso de las ondas sísmicas en terrenos poco consolidados y saturados de agua provocó fenómenos de licuefacción que afectaron a más de 6,000 viviendas y destruyeron las redes de servicios subterráneos.
4. ¿En qué manera las actividades humanas han contribuido a agravar los efectos del terremoto de Tohoku de 2011?
Por un lado, el desarrollo urbano en áreas susceptibles a licuefacción, sin seguir códigos de construcción adecuados para este tipo de terrenos, ha provocado daños extensos a miles de viviendas, así como a las tuberías de agua, gas y al sistema de alcantarillado. Por otra parte, en las regiones montañosas, la construcción en laderas inestables y el colapso de una presa de tierra probablemente mal diseñada han causado la muerte de varias personas.

5. Describe y evalúa las estrategias que se implementaron en Japón tras el sismo de Kobe de 1995 para reducir los efectos de los terremotos.

Tras el sismo de Kobe, se implementaron normas más estrictas de construcción antisísmica y se reforzaron los edificios y la infraestructura existentes para que pudieran resistir violentas vibraciones; se mejoró la red nacional de sismómetros, que hoy en día es la más densa del mundo; se desarrolló un avanzado sistema de alerta temprana, capaz de avisar a millones de personas y activar el apagado automático de infraestructuras críticas en cuestión de segundos; y se entrenó a la población para que reaccionara prontamente ante las alertas sísmicas. A pesar de los daños catastróficos producidos por el tsunami, todas estas medidas han sido exitosas, ya que permitido avanzar en el entendimiento y la predicción de grandes terremotos; han limitado drásticamente los daños estructurales y evitado accidentes mayores; y han garantizado una respuesta oportuna de la población ante la emergencia, contribuyendo a salvar miles de vidas.

Caso 4

Terremoto, tsunami y desastre nuclear en Japón (2011): una catástrofe de múltiples dimensiones

1. Analiza el nivel de preparación de Japón ante el riesgo de tsunamis, tomando en cuenta los logros y limitaciones en la predicción del tsunami de Tohoku en 2011.

Al contar con 12,500 kilómetros de muros de contención a lo largo de la línea costera, un sofisticado sistema de alerta temprana y programas de entrenamiento de la población para reaccionar ante la emergencia, Japón puede considerarse como un país extremadamente preparado para enfrentar tsunamis. Estas medidas han permitido salvar miles de vidas en el pasado y, en 2011, lograron retrasar de algunos minutos la llegada del tsunami, proporcionando tiempo valioso para la evacuación de las comunidades costeras. Sin embargo, una gran limitación en la predicción del tsunami de Tohoku en 2011 fue el no haber contemplado la posibilidad de que un evento de tal magnitud pudiera efectivamente ocurrir, tal como lo demostraban antiguos depósitos de tsunami identificados en el interior de la isla. Ese hallazgo científico debería haber impulsado una reevaluación de las estrategias de mitigación vigentes, y debería haberse comunicado a la población para que esta no subestimara el riesgo y respondiera de manera adecuada ante la alerta.

2. Analiza los factores que llevaron la comunidad científica y la población japonesa a subestimar el riesgo de un tsunami tan grande como el de 2011.

El factor principal que llevó la comunidad científica a subestimar el riesgo fue el hecho de que no se tenía registro histórico de tsunamis de tal magnitud, pues los más grandes registrados estaban asociados a sismos de magnitud 8. Por esta misma razón, y porque se consideraba extremadamente improbable, se desestimó también la advertencia de algunos científicos de que un tsunami mayor podría afectar las costas japonesas, por más que se tuviera evidencia de la existencia de antiguos depósitos de tsunami a gran distancia de la costa. Por otra parte, lo que llevó la población japonesa a subestimar el riesgo fue la falsa sensación de seguridad que les brindaron los muros de contención, pues, hasta ese momento, las barreras diseñadas para contener las olas generadas por sismos de magnitud 8 se habían demostrado eficaces.

3. ¿Con qué otros peligros se relaciona el tsunami de 2011?

El tsunami de 2011 estuvo directamente vinculado a un sismo de magnitud 9.0, pues la energía liberada por el movimiento de la placa Pacífica generó un desplazamiento vertical de hasta 9 metros del fondo marino, que a su vez impulsó la formación de olas gigantes. Por otra parte, el impacto del tsunami en la planta energética de Fukushima Daiichi provocó un accidente que generó un grave peligro nuclear para la población y el medio ambiente.

4. Analiza los errores humanos que, antes y después del tsunami de 2011, contribuyeron a convertir ese evento en una catástrofe.

Un error extremadamente grave fue el haber subestimado la posibilidad de que pudiera ocurrir un tsunami de gran magnitud a pesar de las evidencias geológicas, pues esto llevó a construir muros de contención inadecuados, que no lograron detener la destrucción del territorio hasta 10 kilómetros

tierra adentro, y contribuyeron a la muerte de aproximadamente 15,000 personas. Otro error fue el haber ubicado una infraestructura crítica como la planta nuclear de Fukushima Daiichi en una zona costera vulnerable a sismos y tsunamis, sin contemplar escenarios extremos que pudieran desencadenar un accidente nuclear similar al que ocurrió. Por otra parte, la respuesta inadecuada de la población ante la alerta también contribuyó a agravar las consecuencias del tsunami: de hecho, por más que contaran con 12-15 minutos para ponerse a salvo antes de la llegada de las primeras olas, muchas personas no evacuaron a tiempo, ya que la presencia de las barreras de contención las llevó a subestimar el riesgo. Asimismo, las ineficiencias en la organización y ejecución del plan de evacuación después del accidente nuclear provocaron la muerte de más de 1,600 personas. Finalmente, la incapacidad de controlar la filtración de agua radiactiva al océano generó un serio problema de contaminación ambiental.

5. ¿Qué estrategias podrían implementarse en Japón para minimizar las consecuencias de futuros tsunamis?

Para minimizar las consecuencias de futuros tsunamis, deberían incrementarse la altura y la resistencia de los muros de contención, para que logren proteger a la población frente a eventos extraordinarios como el de 2011. Asimismo, debería mejorarse el diseño de las plantas nucleares, ubicando los generadores de emergencia en áreas seguras contra inundaciones para garantizar su operatividad en condiciones extremas; considerando que Japón es extremadamente vulnerable a fenómenos sísmicos y tsunamis, incluso valdría la pena valorar una transición hacia fuentes de energía alternativa que impliquen menores riesgos para la población y el medio ambiente. Otra acción que debería implementarse para minimizar el impacto de futuros tsunamis sería actualizar las estrategias de mitigación cada vez que nuevos hallazgos científicos permitan anticipar riesgos de mayor magnitud. Finalmente, sería importante concientizar a la población sobre la posibilidad de que ocurran eventos extremos e informarla sobre los riesgos asociados, para promover respuestas más rápidas y efectivas ante situaciones de alerta.

Caso 5

El tsunami del Océano Índico de 2004: lecciones de una tragedia global

1. ¿Qué tecnologías de monitoreo o alerta de tsunamis existían antes del tsunami del Océano Índico de 2004, y por qué no lograron prevenir la tragedia?

Antes del evento de 2004, el Océano Índico no contaba con sistemas de monitoreo o alerta de tsunamis, mientras que, en el Océano Pacífico, el Centro de Alerta de Tsunamis de Hawái estaba equipado para detectar sismos submarinos y emitir alertas locales. Los científicos en Hawái detectaron el sismo de Sumatra y sospecharon que podría generar un tsunami; sin embargo, en ese momento no disponían de la tecnología necesaria para calcular la magnitud real de un evento tan grande, ni contaban con un mecanismo de comunicación directa que les permitiera enviar alertas a los países del Océano Índico. Estas limitaciones contribuyeron a que el tsunami tuviera consecuencias catastróficas.

2. ¿Cómo influyeron el conocimiento y la percepción del riesgo (o su desconocimiento) en la reacción de las personas frente al tsunami de 2004?

En las zonas costeras del Océano Índico, la mayoría de las personas no estaban familiarizadas con tsunamis, ni conocían las señales naturales que suelen anticipar su llegada. Por esta razón, no pudieron actuar a tiempo frente al peligro, y se produjo un número extraordinario de víctimas. Afortunadamente, en algunos casos, el conocimiento y la percepción del riesgo permitieron actuar prontamente y salvar cientos de vidas. Por ejemplo, al notar que el mar se estaba retirando de la playa, una niña británica en Tailandia y un científico en Sri Lanka lograron alertar a otras personas y ponerse a salvo; asimismo, los pueblos indígenas en las islas Andamán y Nicobar aprovecharon la memoria histórica de tsunamis pasados para buscar refugio en zonas topográficamente elevadas justo después de sentir el sismo.

3. ¿Cuál es la relación entre el tsunami y el terremoto ocurrido frente a Sumatra el 26 de diciembre de 2004?

El 26 de diciembre de 2004, el movimiento convergente de las placas Índica y Australiana bajo la microplaca de Birmania produjo un sismo con una magnitud estimada de 9.1 frente a la isla de Sumatra, el cual provocó un desplazamiento vertical del fondo marino de varios metros. El levantamiento repentino del piso oceánico desplazó una gran masa de agua y generó una serie de olas de tsunami que viajaron rápidamente hacia las costas circundantes.

4. ¿Cuáles errores humanos contribuyeron a agravar las consecuencias del tsunami de 2004?

Entre los errores humanos que contribuyeron a transformar el tsunami de 2004 en una verdadera catástrofe, destacan la inexistencia de un sistema de detección de tsunamis en el Océano Índico, que hubiera permitido alertar a los diferentes países horas antes de que las olas impactaran sus costas; y la falta de sistemas de alerta que permitieran advertir oportunamente a las comunidades costeras de la llegada del tsunami. Otro grave error humano fue el no haber implementado programas educativos que prepararan las poblaciones costeras a reconocer las señales precursoras de un tsunami y a actuar prontamente ante el peligro.

5. Describe y evalúa las estrategias que se implementaron tras el evento de 2004 para reducir el impacto de futuros tsunamis en el Océano Índico.

Tras el evento de 2004, se han instalado sistemas de alerta de tsunamis en el Océano Índico, se han colocado sirenas en las zonas costeras para avisar a la población en caso de emergencia, y se han realizado campañas para preparar las comunidades costeras ante estos peligros. Estas medidas demostraron su eficacia en 2009, cuando permitieron reducir significativamente el número de víctimas de un tsunami provocado por un sismo de magnitud 8.1 que afectó Samoa Americana, Samoa y Tonga.

Caso 6

La Conchita: dos deslizamientos (1995 y 2005) y un riesgo que persiste

1. ¿Qué evidencias se tenían sobre el peligro de movimientos en masa en la zona antes de los eventos desastrosos que afectaron La Conchita? ¿Cuáles fueron los eventos precursores de los deslizamientos de 1995 y 2005?

Una evidencia de la vulnerabilidad de la zona frente a movimientos en masa eran las cicatrices de deslizamientos de tierra visibles en el acantilado a lo largo de la Autopista 101; otra clara señal eran los flujos de lodo que, en ocasiones, bajaban por las laderas bloqueando la autopista. Los eventos precursores del deslizamiento de 1995 incluyeron el fracturamiento del acantilado que domina La Conchita, provocado por la actividad de la falla Red Mountain durante el verano de 1994, y una temporada invernal de lluvias particularmente intensas, que sobresaturaron el suelo y contribuyeron al colapso. De manera análoga, el evento precursor que detonó el movimiento en masa de 2005 fueron dos semanas de lluvias extraordinarias, que saturaron el terreno y movilizaron parte del material del deslizamiento de 1995, generando un nuevo flujo de escombros.

2. ¿Qué medidas se propusieron tras el evento de 1995 para reducir el riesgo de deslizamientos en La Conchita, y por qué no se implementaron?

Tras el deslizamiento de 1995, el estudio encargado de evaluar el riesgo de futuros movimientos en masa y proponer estrategias de mitigación recomendó construir terrazas para reducir la pendiente de la ladera, e instalar un elaborado sistema de drenaje que permitiera tener bajo control el nivel de saturación del terreno. Aunque podían atacar directamente a los dos factores clave responsables de la inestabilidad del acantilado, estas medidas no se llevaron a cabo, debido a que su costo, estimado en 150 millones de dólares, fue considerado prohibitivo tanto por las autoridades como por la comunidad.

3. ¿Qué otros peligros naturales están relacionados con el peligro de deslizamientos en La Conchita?

El peligro de movimientos en masa en La Conchita está estrechamente relacionado con otros peligros naturales, como terremotos y eventos meteorológicos extremos. Por un lado, la actividad tectónica de la falla Red Mountain fractura las rocas del acantilado que se alza sobre la comunidad, debilitándolas y disponiéndolas al colapso; las vibraciones sísmicas producidas por el desplazamiento a lo largo de la falla también contribuyen a desestabilizar tanto el basamento fracturado como su cubierta de sedimentos no consolidados, incrementando el riesgo de movimientos en masa. Por otra parte, los eventos de precipitaciones extremas actúan como detonantes inmediatos al sobresaturar el terreno y reducir la cohesión interna de los materiales.

4. ¿Cuáles errores humanos contribuyeron a agravar las consecuencias del movimiento en masa de 2005 y por qué?

Una decisión que contribuyó a agravar las consecuencias del movimiento en masa de 2005 fue optar por medidas de mitigación del riesgo limitadas, en lugar de invertir en una solución integral tras el deslizamiento de 1995. Se construyó un pequeño muro de contención que no solo no logró proteger la comunidad del flujo de escombros de 2005, sino que además contribuyó a desestabilizar el talud,

ya que para levantarlo fue necesario remover material de la base de la ladera. Tampoco se consideró prioritario invertir en un elaborado sistema de drenaje, por lo que, a principios de 2005, tras dos semanas de lluvias extraordinarias, el subsuelo se sobresaturó y el material del talud se movilizó como un flujo de escombros. Finalmente, la decisión de algunos residentes de permanecer en La Conchita a pesar del riesgo geológico persistente costó la vida de diez personas, que murieron sepultadas por el flujo de escombros de 2005.

5. ¿Cómo se involucraron los residentes de La Conchita, el condado de Ventura y el gobierno estatal en los esfuerzos por minimizar las consecuencias de los movimientos en masa?

Tras el deslizamiento de 1995, el Condado de Ventura reaccionó oportunamente, ya que declaró el área de La Conchita como zona de riesgo geológico, impuso restricciones al desarrollo urbano y encargó un estudio geológico para evaluar el riesgo de futuros movimientos en masa y proponer medidas para estabilizar el acantilado; lamentablemente, las soluciones propuestas no fueron tomadas en cuenta por la comunidad, que optó por estrategias de mitigación menos eficaces. En cuanto a la respuesta de los residentes, tras el deslizamiento de 1995 algunos decidieron mudarse, mientras que otros se quedaron o incluso adquirieron otras propiedades; estas reacciones contrastantes revelan que, aunque se tenía conocimiento del peligro, una limitada percepción, comprensión y aceptación del riesgo afectó la capacidad de algunos para tomar decisiones adecuadas. Finalmente, tras la tragedia de 2005, los habitantes se decidieron a colaborar con las autoridades en la búsqueda de soluciones efectivas. En este sentido, el gobierno estatal destinó un fondo de 600,000 dólares para identificar métodos eficaces de mitigación del riesgo. Además, se emprendió una acción legal contra una empresa agrícola ubicada en la cima del acantilado por un deficiente manejo del drenaje, que terminó por reconocerle una corresponsabilidad en el desastre de 2005. Cabe destacar que, a la fecha, se han implementado pocas medidas para estabilizar la ladera, y la comunidad de La Conchita sigue expuesta a un riesgo latente de movimientos en masa.

Caso 7

Cuando la tierra no se detiene: la historia del deslizamiento en Portuguese Bend, California

1. ¿Qué métodos se han empleado para monitorear el deslizamiento en Portuguese Bend?
Para monitorear el deslizamiento en Portuguese Bend se han empleado diversas metodologías, como la perforación de pozos para medir el nivel del agua subterránea y tener bajo control el nivel de saturación, y el uso de sensores GPS y técnicas de interferometría satelital para registrar desplazamientos del terreno a la escala milimétrica.
2. Tras la reactivación del deslizamiento, ¿cómo ha influido el conocimiento del riesgo sobre las decisiones tomadas por las autoridades y los habitantes?
El conocimiento del riesgo impulsó el desarrollo de estudios geológicos enfocados a comprender el fenómeno e identificar soluciones para estabilizar la masa deslizada. En lugar de optar por una reubicación definitiva, muchos residentes decidieron quedarse y adaptarse al movimiento del terreno, realizando ajustes periódicos a sus viviendas e instalando las líneas de servicios públicos sobre la superficie; sin embargo, a la fecha no se han autorizado nuevas construcciones. Actualmente, se sigue monitoreando el movimiento del talud, mientras las autoridades evalúan la implementación de nuevas técnicas de mitigación.
3. ¿Qué relación existe entre la ocurrencia de precipitaciones intensas y la reactivación o aceleración del deslizamiento en Portuguese Bend?
Entre los dos fenómenos existe una relación directa; de hecho, se reporta que, en los años más lluviosos, la velocidad del movimiento llegó a superar los 2.5 centímetros diarios. Esta relación se explica considerando que las precipitaciones intensas sobresaturan el subsuelo, reduciendo la cohesión de los materiales y facilitando su movilización.
4. ¿Cuáles acciones humanas han contribuido a reactivar el antiguo deslizamiento en Portuguese Bend?
Se considera que la reactivación del movimiento fue inducida por un relleno de tierra que fue colocado en la parte superior del antiguo deslizamiento, en donde se construiría una autopista: al añadir peso en la parte alta del talud, se alteró el equilibrio del terreno y se fomentó su inestabilidad. Por otra parte, las actividades de irrigación de jardines y huertas, así como la descarga de sistemas sépticos privados, pudieron haber contribuido a sobresaturar el subsuelo, reduciendo la cohesión de los materiales y facilitando su desplazamiento.
5. Describe las estrategias que se han implementado en Portuguese Bend para mitigar los efectos del deslizamiento y reducir los daños.
Entre las estrategias enfocadas a estabilizar el talud, en 1980 se han perforado unos pozos que permitieron drenar los materiales del deslizamiento y tener bajo control su nivel de saturación; en la actualidad, se está contemplando reforzar la ladera con anclajes y muros. Por otra parte, para reducir los daños a propiedades e infraestructura, se ha restringido la construcción de nuevas viviendas en la zona inestable; las viviendas ubicadas en la zona activa del deslizamiento son ajustadas

periódicamente con gatos hidráulicos para adatarlas al continuo desplazamiento del terreno; y las líneas de los servicios de agua, gas y electricidad se han instalado sobre la superficie para evitar que se deformen por el movimiento.

Caso 8

El río Misisipi y sus crecidas (1973-2008): procesos naturales e intervención humana

1. ¿Cuáles factores naturales pueden dificultar una predicción precisa de las crecidas del río Misisipi?
Entre los factores naturales que pueden limitar la capacidad de anticipar el comportamiento del río Misisipi y sus crecidas, destaca la complejidad de prever con exactitud factores tan variables como la cantidad, intensidad, distribución y duración de las precipitaciones. Otra variable que dificulta la predicción de las crecidas del río es el grado de saturación en agua del suelo, el cual depende de las condiciones meteorológicas de las semanas o meses anteriores.

2. ¿Cómo ha influido el conocimiento del riesgo en la planificación urbana en la llanura de inundación del Misisipi?

El conocimiento del riesgo de inundaciones ha tenido una influencia ambivalente en la planificación urbana en la llanura de inundación del Misisipi. Por un lado, ha sido ampliamente subestimado, ya que se ha permitido el desarrollo urbano en zonas altamente vulnerables que, en múltiples ocasiones, como en 1973, 1993 y 2008, han sufrido daños que afectaron a miles de personas y propiedades. Por otro lado, el conocimiento del riesgo impulsó la construcción de obras de control de inundaciones, como presas, diques y muros de contención, con el objetivo de proteger a las comunidades asentadas en estas zonas. Sin embargo, estas soluciones no siempre han sido eficaces y, en algunos casos, han generado una falsa sensación de seguridad, alentando un mayor desarrollo en áreas de riesgo.

3. ¿Qué papel juegan las tormentas y el cambio climático en las crecidas del Misisipi y sus inundaciones?

Las precipitaciones, y en particular las lluvias extremas asociadas a las tormentas, juegan un papel clave en las crecidas del río Misisipi, ya que influyen directamente en la cantidad de agua que recibe el sistema fluvial. Por ejemplo, las grandes inundaciones de 1993 y 2008 fueron provocadas por unas lluvias excepcionales que se prolongaron durante meses. Estos eventos extremos están vinculados al cambio climático, ya que el calentamiento global tiende a incrementar su frecuencia e intensidad. En este sentido, el cambio climático también afecta las crecidas del Misisipi, y contribuye a incrementar la probabilidad de ocurrencia de inundaciones severas.

4. ¿En qué manera el desarrollo urbano en la llanura de inundación del río Misisipi ha contribuido a incrementar el riesgo de inundaciones y a agravar sus consecuencias?

El desarrollo urbano ha contribuido a incrementar el riesgo de inundaciones ya que ha reducido la capacidad natural del sistema fluvial para absorber el exceso de agua. En específico, la construcción de viviendas, edificios y carreteras en la llanura de inundación ha provocado una impermeabilización del suelo que impide la infiltración natural del agua, y ha llevado a la desaparición de humedales que funcionaban como áreas de almacenamiento temporal del agua. Por otro lado, las obras de control de inundaciones han llegado a agravar las consecuencias de los mismos fenómenos, pues, en ocasiones, las presas no han logrado contener lluvias prolongadas y han generado inundaciones; asimismo, al estrechar el cauce del río, los diques y muros de contención pueden provocar que el

agua se acumule en un canal reducido, eleve su nivel y ejerza presión sobre las defensas, hasta inducir su colapso.

5. ¿Qué estrategias se han implementado después de las grandes inundaciones del río Misisipi para minimizar las consecuencias de eventos futuros?

Después de las grandes inundaciones, el gobierno federal había comenzado a adquirir varios terrenos en la llanura de inundación del Misisipi, con el objetivo de frenar la urbanización en zonas vulnerables y permitir que el río recuperara parte de la planicie. Lamentablemente, los intereses económicos han frenado esta estrategia, y el gobierno se ha visto presionado a autorizar el desarrollo urbano en áreas que contarán con la protección de diques. Sin duda, la estrategia más eficaz para limitar los daños de futuras inundaciones ha sido la reubicación de algunas comunidades en zonas topográficamente más elevadas.

Caso 9

¿Por qué se inunda Houston? Lluvias extremas, expansión urbana y falta de prevención

1. Por lo general, si se cuenta con pronósticos meteorológicos precisos y sistemas de monitoreo de las corrientes de agua, las inundaciones se pueden predecir. ¿Consideras que la inundación de Houston podría haberse anticipado?

Aunque no cabía duda de que el huracán Harvey habría provocado lluvias torrenciales, la cantidad extraordinaria de precipitación que se descargó sobre Houston en esa ocasión (el equivalente a un año de lluvias en tan solo dos días) rebasó cualquier pronóstico. Por estas características excepcionales, probablemente no fue posible anticipar la magnitud de la inundación de 2017.

2. Analiza el riesgo de inundaciones en Houston antes y después del evento de 2017, tomando en cuenta lo que se conoce sobre la probabilidad de ocurrencia de inundaciones.

Por su baja topografía, sus numerosos canales y arroyos, y por el alto grado de impermeabilización del terreno sobre el cual se asienta, Houston es una ciudad vulnerable a inundaciones. Antes de 2017, sin embargo, este riesgo estaba subestimado, ya que los mapas de riesgo disponibles, elaborados en 2007, solo contemplaban eventos de inundaciones de 100 y 500 años, y tampoco tomaban en cuenta los efectos de la expansión urbana sobre la permeabilidad del suelo, ni la mayor frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos provocados por el calentamiento global. La falta de información precisa sobre el riesgo real de inundaciones hizo que gran parte de la población no estuviera preparada para enfrentar el evento de 2017. La inundación de 1,000 años que ocurrió en 2017 dejó claro que el riesgo era mucho mayor de lo que se había reconocido oficialmente. Este tipo de inundaciones, que ocurren en promedio una vez cada mil años, tienen una probabilidad anual del 0.1%. Sin embargo, esta probabilidad no disminuye después de que ocurre un evento de tal magnitud, ya que, al ser provocadas por fenómenos meteorológicos, las inundaciones son independientes una de otra. De hecho, dado que el cambio climático está incrementando la frecuencia de las precipitaciones extraordinarias, es probable que, en el futuro, también las inundaciones extremas, como las de 1,000 años, se vuelvan más frecuentes.

3. ¿Qué otros peligros naturales estuvieron relacionados con la inundación de Houston de 2017?
La inundación de Houston de 2017 fue provocada por un evento de precipitaciones extraordinarias relacionado con el paso del Huracán Harvey. En dos días, se descargaron sobre la ciudad 125 centímetros de lluvia, que incrementaron el caudal de canales y arroyos y causaron una inundación de 1,000 años.

4. ¿Cuáles acciones y decisiones humanas contribuyeron a agravar las consecuencias de la inundación de Houston de 2017?

Entre las acciones y decisiones humanas que contribuyeron a agravar las consecuencias del evento de 2017, destacan el rápido crecimiento de la población, acompañado por una expansión urbana no regulada que permitió el desarrollo en zonas susceptibles a inundaciones; la falta de actualización de los mapas de riesgo, que generó una falsa sensación de seguridad y limitó la capacidad de gran

parte de la población para prepararse ante la eventualidad de un evento mayor, por ejemplo, contratando seguros contra inundaciones o instalando sistemas de protección en sus propiedades; y el alto grado de impermeabilización del terreno, que impidió la infiltración del agua y provocó que las precipitaciones extremas se descargaran por completo en las corrientes superficiales, incrementando de manera excepcional el caudal de canales y arroyos.

5. ¿Qué recomendaciones harías para ayudar a minimizar las consecuencias de futuras inundaciones en Houston?

Para minimizar el impacto de futuras inundaciones en Houston, el gobierno debería actualizar los mapas de riesgo y restringir el desarrollo urbano incluso en las áreas que podrían sufrir inundaciones de 1,000 años. También, se debería mejorar el sistema de drenaje urbano, y garantizar un correcto funcionamiento y gestión de las estructuras de control de inundaciones. Con el fin de contrarrestar los efectos la impermeabilización del terreno asociada a la urbanización, recomendaría el desarrollo de infraestructura verde, como parques inundables y humedales urbanos: al permitir la infiltración del agua en el subsuelo, de hecho, estas soluciones evitarían que la lluvia se descargue exclusivamente en la escorrentía, reduciendo el caudal de las inundaciones. Finalmente, las autoridades deberían implementar sistemas eficaces de alerta temprana, y entrenar a la población para que aprenda a actuar prontamente ante una emergencia. Por otra parte, a los residentes les recomendaría adquirir un seguro contra inundaciones, incluso si sus propiedades están afuera de las áreas oficialmente clasificadas como “de alto riesgo”; y valorar la instalación de barreras u otras medidas de protección que permitan minimizar los daños a sus propiedades ante futuras inundaciones.

Caso 10

La Isla Folly: dinámica costera, erosión y manejo del riesgo geológico

1. ¿Qué métodos se utilizan para monitorear la erosión costera en la Isla Folly?

Para monitorear la erosión costera en la Isla Folly, se realizan mediciones del retroceso de la línea de costa, las cuales indican que las playas se están retirando a velocidades de entre 30 centímetros y 2 metros por año. Se realizan también estudios geológicos que analizan los cambios en la deposición de arena asociados tanto a la dinámica natural de la isla como al aumento del nivel del mar; así como el efecto de fenómenos meteorológicos extremos (tormentas y huracanes) y barreras artificiales (muros y rompeolas) sobre la erosión costera y los rellenos artificiales.

2. ¿Cómo ha influido el conocimiento del riesgo asociado a la erosión costera y al aumento del nivel del mar en las decisiones sobre la protección costera y la planificación urbana en la Isla Folly?

El conocimiento del riesgo asociado a la erosión costera ha llevado a implementar regulaciones que restringen la construcción de estructuras de protección como muros o rompeolas frente a la costa, ya que, con el pasar del tiempo, dichas estructuras tienden a incrementar el proceso erosivo. Asimismo, para reducir el riesgo y contrarrestar la pérdida de arena, se ha implementado el relleno artificial de las playas. Por otra parte, el conocimiento del riesgo asociado al aumento del nivel del mar ha llevado a construir viviendas sobre pilotes, aunque la altura de dichas estructuras se determina a partir de mapas de riesgo que no están considerando el incremento del nivel del mar que ocurrirá en el corto plazo.

3. ¿Cuál es la relación entre la erosión costera de la Isla Folly y otros peligros, como tormentas, huracanes y el aumento del nivel del mar asociado al cambio climático?

Todos estos procesos intensifican el problema de la erosión costera, ya que el aumento del nivel del mar tiende a desplazar la deposición de arena hacia el continente, mientras que las marejadas provocadas por tormentas y huracanes aceleran la pérdida de arena e incluso dispersan los rellenos artificiales.

4. ¿Qué impacto han tenido las acciones humanas en la erosión costera de la Isla Folly?

Al interrumpir el aporte de nuevo sedimento a las playas, las medidas implementadas para proteger las infraestructuras y propiedades, como barreras, muros de contención y rompeolas, han alterado el equilibrio natural entre deposición y erosión costera, determinando una intensificación del proceso erosivo en la Isla Folly. El relleno artificial de las playas procura compensar los efectos de la erosión y restaurar el equilibrio del sistema costero, aunque el aumento del nivel del mar y los fenómenos meteorológicos extremos tienden a reducir la efectividad de esta intervención.

5. ¿Qué estrategias podrían implementarse para minimizar el impacto de la erosión costera en la Isla Folly?

Para minimizar el impacto de la erosión costera, el relleno artificial de playas podría complementarse con la restauración de humedales costeros, los cuales ayudarían a estabilizar la arena y funcionarían como una barrera natural capaz de absorber la energía de las olas. Por otra parte, deberían

implementarse restricciones más severas al desarrollo en zonas vulnerables, y llevarse a cabo acciones de reubicación estratégica en aquellas áreas en donde el mantenimiento de la infraestructura resulte insostenible ante el aumento del nivel del mar. Para esto, sería fundamental actualizar los mapas de riesgo, de manera que incorporen proyecciones realistas del avance del mar y de los patrones de erosión a futuro.