

2023

SZ4D

RESUMEN EJECUTIVO



RESUMEN EJECUTIVO

FUNDAMENTO CIENTÍFICO Y SOCIAL

Las Zonas de Subducción en Cuatro Dimensiones (SZ4D), son una nueva iniciativa científica interdisciplinaria multidécada e impulsada por la comunidad que se esfuerza por comprender cómo interactúan los diferentes componentes de los sistemas de zonas de subducción para producir y ampliar los peligros geológicos con el tiempo. Aborda las principales brechas en nuestra comprensión de los peligros geológicos aprovechando la disponibilidad de nuevas técnicas de observación, analíticas y computacionales y coordinando la investigación fundamental sobre las características y procesos físicos y químicos en las zonas de subducción. Las zonas de subducción ofrecen la oportunidad de investigar estratégicamente los peligros integrados simultáneamente y realizar experimentos naturales bien controlados que se pueden utilizar para aislar y estudiar factores clave que impulsan los peligros geológicos. Una piedra angular de SZ4D es reunir a científicos con una amplia gama de orígenes geocientíficos y conjuntos de habilidades que estudian terremotos, erupciones volcánicas y procesos superficiales.

Los principales peligros geológicos de la Tierra se concentran en zonas de subducción, lugares donde una placa tectónica se desliza por debajo de otra. Los terremotos y los tsunamis pueden causar devastación a enormes escalas, alterando así a toda la sociedad. Las grandes erupciones volcánicas han destruido repetidamente ciudades y alterado los patrones climáticos a lo largo de la historia de la humanidad, lo que ha provocado pérdida de cultivos, hambruna y disminución y migración de la población. Los deslizamientos de tierra, los flujos de detritos y las inundaciones han arrasado pueblos y aldeas de montaña, alterado la agricultura, cortado las rutas de transporte y afectado profundamente por igual a las poblaciones urbanas y rurales. A pesar de la ambición global de pronosticar estos peligros geológicos, solo tenemos una comprensión limitada de los complejos procesos físicos y químicos que interactúan para desencadenar terremotos, tsunamis y erupciones volcánicas. También tenemos una comprensión limitada de las muchas formas en las que estos peligros geológicos están vinculados a los procesos de la superficie terrestre, como la erosión y el depósito de sedimentos.

Hasta la fecha, el progreso en la comprensión de la previsibilidad potencial de los peligros geológicos no solo se ha visto limitado por vacíos persistentes de conocimiento, sino que se ha visto obstaculizado por estudios que históricamente se han realizado dentro de límites disciplinares. Sin embargo, hay temas intersectoriales obvios y compartidos que vinculan los estudios de zonas de subducción, lo que sugiere que un enfoque interdisciplinario impulsaría significativamente la ciencia.

Este documento proporciona los detalles de cómo la comunidad científica implementará SZ4D a lo largo de la vida útil decenal de la iniciativa. Describe los componentes de observación, experimentales y numéricos necesarios para capturar el rango de escalas espaciales y temporales sobre las que operan los procesos de zona de subducción y la inversión significativa y sostenida en infraestructura humana y física

necesaria para respaldar este esfuerzo. Utilizando un modelo de impacto colectivo, los científicos coordinarán estrechamente su investigación en todas las disciplinas y aprovecharán los esfuerzos existentes para que las nuevas actividades se basen en apoyos de éxitos pasados. Para permitir una estrecha integración y fases dentro y entre los componentes de este plan de implementación, un centro coordinará el despliegue de recursos humanos e instrumentales, mientras que los investigadores individuales también tendrán la capacidad de ser creativos a través de un programa científico de SZ4D dedicado. Con la participación de una comunidad diversa de científicos y partes interesadas en este esfuerzo de SZ4D, estamos preparados para dar un gran paso adelante en nuestra comprensión de los peligros de la zona de subducción para el beneficio de la sociedad.

DESARROLLO DEL PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

SZ4D está compuesto por 74 representantes miembros de comunidades de investigación de los EE. UU. que estudian terremotos, erupciones volcánicas y procesos superficiales en zonas de subducción.

SZ4D se organiza en:

TRES GRUPOS DE TRABAJO

Relieves terrestres y relieves marinos (L&S)

Ciclos de fallas y terremotos (FEC)

Desencadenantes magmáticos de erupciones (MDE)

DOS GRUPOS INTEGRADORES

Desarrollo de equidad y capacidad geocientífica (BECG)

Modelado colaborativo para la subducción (MCS)

A través de una combinación de reuniones, talleres, seminarios web y asambleas, SZ4D ha involucrado a más de 3400 participantes que han identificado en colaboración prioridades comunitarias y observaciones y mediciones clave que permitirán los avances científicos necesarios para comprender mejor los peligros geológicos con el fin de mitigar sus riesgos para la sociedad.

Los **grupos de trabajo** y los **grupos integradores** sintetizaron las aportaciones de la comunidad e identificaron preguntas clave que la iniciativa de SZ4D debe abordar:

- o ¿Cuándo y dónde se producen grandes terremotos dañinos?
- o ¿Cómo inician los procesos transcorticales las erupciones en los arcos volcánicos?
- o ¿Cómo generan y transportan sedimentos los eventos dentro de la atmósfera, la hidrósfera y la tierra sólida a través de relieves terrestres y relieves marinos de la zona de subducción?
- o ¿Qué fracción del balance energético de una zona de subducción se destina a crear y dar forma a la zona de subducción de relieves terrestres y marinos?
- o ¿Cómo podemos transformar la mentalidad de nuestra comunidad para adoptar la educación, la difusión, la accesibilidad, las asociaciones internacionales, la diversidad, la equidad, la inclusión y las ciencias sociales como componentes fundamentales para el éxito de las geociencias?

A partir de estas preguntas surgen varios temas intersectoriales. Todos los estudios de peligros geológicos se esfuerzan por establecer las circunstancias bajo las cuales se pueden pronosticar eventos catastróficos, si estas circunstancias realmente existen o se pueden medir. La ocurrencia de grandes terremotos, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra reflejan la forma en que la masa y la energía se introducen, equilibran y transfieren dentro de las zonas de subducción. El estrés que refleja estas entradas de masa y energía dan lugar a movimientos que dependen de la reología de los materiales de la Tierra, ya sea dentro de la tierra sólida, cerca de la superficie o parte de la atmósfera. Los fluidos, y cómo migran a través del sistema terrestre, son determinantes clave de dónde, cuándo y cómo se producirán grandes deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas y terremotos. El cambio climático y la variabilidad pueden alterar las cargas superficiales que influyen en el transporte de fluidos volcánicos, el estrés dentro de la corteza y la hidrología cerca de la superficie que puede desencadenar deslizamientos de tierra. Por último, los peligros geológicos no se producen aislados entre sí, pero pueden desencadenarse y resultar en una cascada de otros peligros que pueden amplificar el impacto de estos fenómenos.

REQUISITOS DE INFRAESTRUCTURA

Para responder a las preguntas científicas clave planteadas por SZ4D, es necesario recopilar un conjunto diverso de observaciones a una serie de escalas temporales y espaciales tanto en tierra como bajo el mar (**Figura ES-1**). Tres componentes clave de la infraestructura de SZ4D in situ hacen posible esta recopilación de datos:

1. **MegaArray** | Una red instrumental central a gran escala y a largo plazo de instrumentos geodésicos y sísmicos *anfíbios* (es decir, que integran a la perfección observaciones terrestres y marinas) densificados en áreas clave
2. **VolcArray** | Una red instrumental volcánica estandarizada multicomponente
3. **SurfArray** | Conjunto de redes instrumentales de detección de cambios en la superficie y el entorno que capturan imágenes de los cambios en el subsuelo poco profundo de la Tierra, la superficie y las condiciones atmosféricas

Aunque las redes instrumentales primarias proporcionarán nuevas restricciones en diferentes facetas del comportamiento de la zona de subducción, **se requieren esfuerzos adicionales de observación, experimentales y de modelado, así como programas de desarrollo humano, para contextualizar y explicar ese comportamiento; cada uno de**

estos componentes tiene necesidades de infraestructura asociadas. Para este esfuerzo es esencial la infraestructura computacional proporcionada por el grupo integrador MCS, que permitirá a la comunidad integrar los resultados de las redes instrumentales y otras actividades, lo que dará como resultado un retrato de las zonas de subducción en el espacio y el tiempo.

Para fomentar un cambio cultural en los esfuerzos de investigación y garantizar que los resultados se comuniquen a las comunidades afectadas por los peligros geológicos, el grupo integrador de BECG desarrolló un conjunto completo de actividades para que la comunidad de SZ4D las implemente. Estos esfuerzos pueden habilitarse bajo un modelo de impacto colectivo que haga hincapié en las actividades de alta prioridad, que incluyen el establecimiento de asociaciones y coordinación sostenidas que permitirán el cambio social a través de comunidades de práctica y el trabajo objetivo de los investigadores principales (PI) de BECG hacia áreas con el máximo impacto.

IMPLEMENTACIÓN POR FASES Y CRONOGRAMA PREVISTO

Todos los componentes de SZ4D destacan la importancia de las fases, en los que estas últimas se basan en la información generada por fases anteriores. La fase propuesta de las actividades de cada grupo de trabajo e integrador tiene un cronograma diferente. La MegaArray y las imágenes geofísicas asociadas y la caracterización geológica comenzarán a gran escala y pasados cinco años procederán a identificar áreas objetivo clave que justifiquen un estudio centrado y redes instrumentales densificadas. VolcArray primero desarrollará y probará redes instrumentales en algunos volcanes y luego se expandirá a una cartera de aproximadamente 30 sistemas activos para observaciones a largo plazo y seis sistemas clave para estudios densos. Los investigadores de relieves terrestres y relieves marinos adoptarán

un enfoque similar con SurfArray, pero se dirigirán hacia una comparación cuidadosamente diseñada de ubicaciones emparejadas para diferenciar procesos clave. En paralelo a los esfuerzos de observación, los esfuerzos de modelado y experimentales también seguirán un enfoque por fases para la asimilación de datos, el desarrollo del flujo de trabajo y la recopilación de datos centrales. La coordinación de la fase entre los esfuerzos de observación, experimentales y numéricos es necesaria para integrar los resultados, para informar de la planificación de las fases futuras y para responder a las preguntas de investigación de SZ4D. En resumen, la sincronización de todos los componentes de SZ4D debe realizarse de forma gradual de forma que los diferentes componentes interdependientes puedan ejecutarse sin problemas durante la vida útil de SZ4D.

SITIOS GEOGRÁFICOS

Los grupos de trabajo e integradores de SZ4D evaluaron sistemáticamente las características de las zonas de subducción del mundo para determinar si un esfuerzo centrado en una o más regiones permitiría a los investigadores responder a preguntas científicas de SZ4D. Los grupos también reconocieron el imperativo de una iniciativa financiada por los EE. UU. para contribuir sustancialmente a cubrir las brechas de conocimiento fundamentales que afectan al riesgo nacional y a la mitigación de peligros. Después de considerar las necesidades de todas las comunidades representadas por los grupos de trabajo e integradores en su conjunto, SZ4D reconoció que las comparaciones centradas entre las zonas de subducción internacionales y nacionales ofrecían las mejores oportunidades para abordar las preguntas científicas clave. Chile/Argentina, Cascadia y Alaska fueron reconocidos como lugares ideales para los esfuerzos de SZ4D. La zona de subducción chileno-Argentina es lo suficientemente activa desde el punto de vista geológico como para proporcionar información útil durante un despliegue científico y es altamente accesible con una infraestructura científica.

en un solo país asociado y tiene regiones que forman importantes estudios comparativos para nuestros centros nacionales. Los grupos recomiendan implementar ~70 % de los esfuerzos de instrumentación en Chile-Argentina, ~20 % en Cascadia y ~10 % en Alaska. Los grupos también reconocen que las actividades científicas asociadas, como los estudios geológicos, el modelado, los experimentos de laboratorio y la creación de equidad y capacidad, están adecuadamente equilibradas de forma diferente. Los grupos recomiendan una cartera de ~50 % de actividades en Chile-Argentina, ~40 % en Cascadia y ~10 % en Alaska. Se necesitan comparaciones globales con otras zonas de subducción para generalizar los resultados de estas ubicaciones, y esto se puede lograr de forma más efectiva y significativa mediante el desarrollo de una red científica internacional que aproveche los esfuerzos paralelos de otros países.

ORGANIZACIÓN Y GOBERNANZA DE SZ4D

La implementación de SZ4D requiere inversión en varias áreas clave, algunas de las cuales existen actualmente, y otras que deben desarrollarse, combinarse o aumentarse. La primera, una estructura de gestión central, llamada **centro de SZ4D**, coordinará las diferentes instalaciones existentes y nuevas responsables de la gran mayoría de la recopilación de datos, facilitará la integración científica de SZ4D y coordinará estos elementos con socios y partes interesadas para maximizar el impacto colectivo de los esfuerzos de SZ4D. El centro sería supervisado por un Comité Directivo del Centro, cuyos miembros serán elegidos por un proceso abierto supervisado por el grupo de BECG de modo que la diversidad, la equidad y la inclusión sean el centro del proceso. La segunda área clave de inversión abarca cinco instalaciones nuevas y existentes.

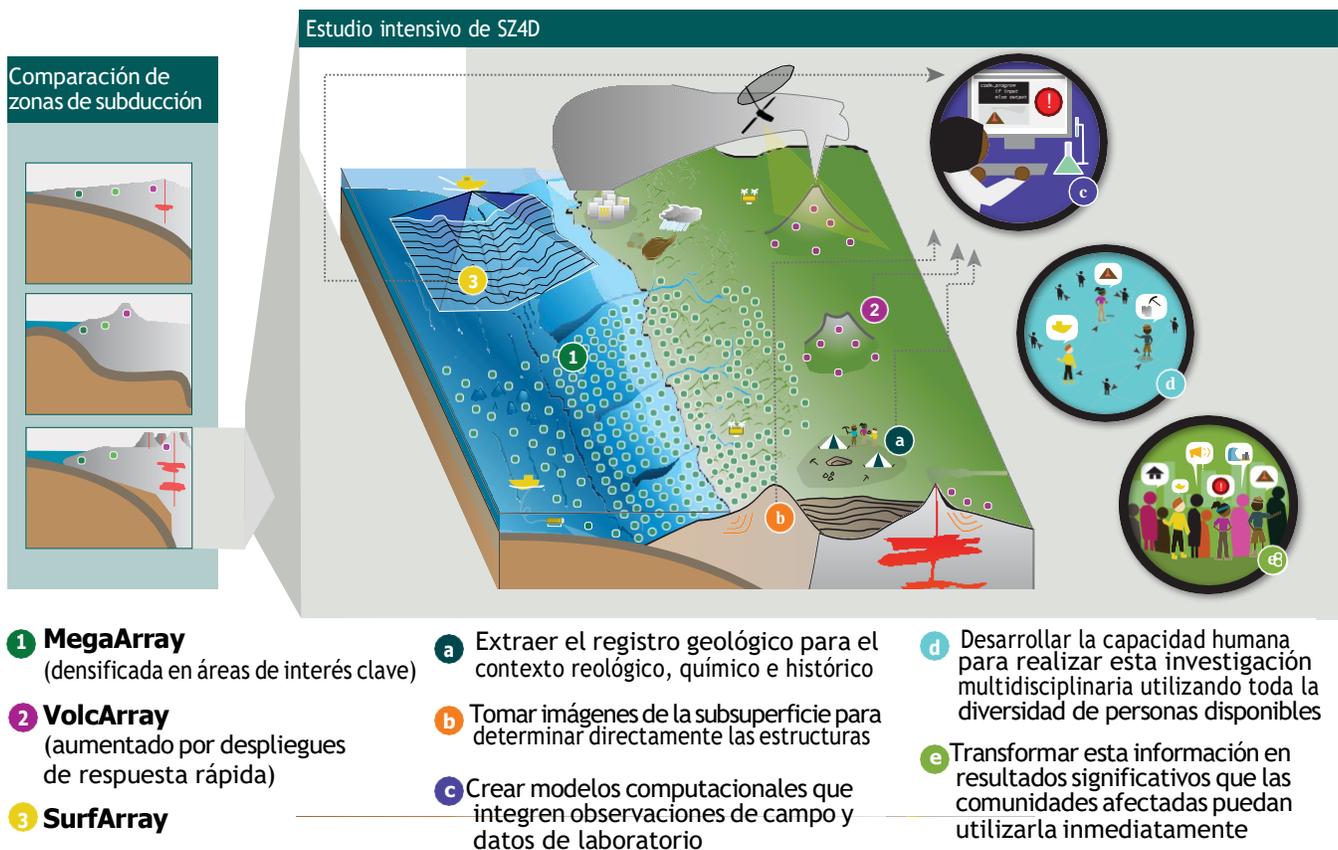
1. **Instrumentación marina**, incluidas MegaArray y SurfArray. Esta nueva instalación proporcionará soporte dedicado para grupos de instrumentos sísmicos y geodésicos, recopilación de batimetría de alta resolución y otros datos de imágenes geofísicas, equipos de ingeniería operativa y buques marinos (tripulados y autónomos) para el despliegue, el servicio y la respuesta rápida cerca de los sitios de despliegue denso.
2. **Redes instrumentales en tierra**, incluido el componente de VolcArray, SurfArray y MegaArray. Las instalaciones actuales pueden, en parte, aprovecharse para satisfacer las necesidades del grupo de instrumentación terrestre.
3. Logística para la recogida de muestras, instrumentación y programas de campo que implican **despliegues humanos** como instrumentos de observación principales para recopilar datos sistemáticos y estandarizados, incluida la paleosismología, mapeo de estructuras, muestras para geocronología, geoquímica y petrología. Imaginamos una instalación que incluya una estación de campo que pueda apoyar la logística de campo, las adquisiciones de imágenes y la autorización, el archivado y el transporte de muestras.
4. Un **modelado colaborativo**. Esta instalación desarrollaría nuevos modelos físicos de zona de subducción y herramientas computacionales que aprovechen los avances en aprendizaje automático para la ciencia basada en datos, así como proporcionar recursos para su uso por parte de toda la comunidad de investigación SZ4D, incluidos estudiantes, postdoctorandos e investigadores.
5. Un **Consorcio de Laboratorio y Muestras**. Este consorcio permitiría el estudio de las propiedades de los materiales, la reología durante la deformación y el equilibrio de fases de los sistemas fundidos.

El componente final de la Iniciativa de SZ4D es un **Programa de Ciencias** de la Fundación Nacional de Ciencias que identifica y permite la investigación científica emergente más importante relacionada con SZ4D utilizando un mecanismo de revisión de paneles basado en méritos. La comunicación regular entre el programa científico y el Comité Directivo del Centro de SZ4D ayudaría a coordinar la recopilación de datos e identificar prioridades científicas durante todo el programa. El enfoque de tres componentes definido aquí, un Centro, Instalaciones y Programa de Ciencias, maximizará el impacto científico y social de la iniciativa de SZ4D y ayudará a formar a la próxima generación de investigadores geocientíficos multipeligros.

PERSPECTIVA

SZ4D está preparado para realizar importantes avances en la comprensión de la ciencia detrás de los peligros de la zona de subducción mediante la implementación estratégica de nuevos instrumentos en pares de zonas de subducción, el desarrollo de modelos más sofisticados y precisos utilizando avances en computación, la coordinación de la amplitud de la investigación de peligros geológicos utilizando un enfoque de impacto colectivo e la integración de una comunidad diversa de científicos y partes interesadas que aportarán una amplia gama de habilidades, conocimientos e ideas a este esfuerzo. Para tener éxito, este esfuerzo colaborativo a largo plazo requiere una estrecha coordinación entre todos los componentes y una profunda integración a lo largo del programa, comenzando en sus primeras fases. Alcanzar los objetivos de SZ4D no solo proporcionará nuevos conocimientos de los procesos físicos y químicos en el trabajo en las zonas de subducción, sino que también puede proporcionar beneficios tangibles a las comunidades que viven en regiones afectadas por los peligros de las zonas de subducción.

Figura ES-1. Esquema de las principales redes instrumentales y actividades de SZ4D. (Katy Cain/ Carnegie Institution for Science)



BARRA LATERAL 1

¿Qué es una zona de subducción?

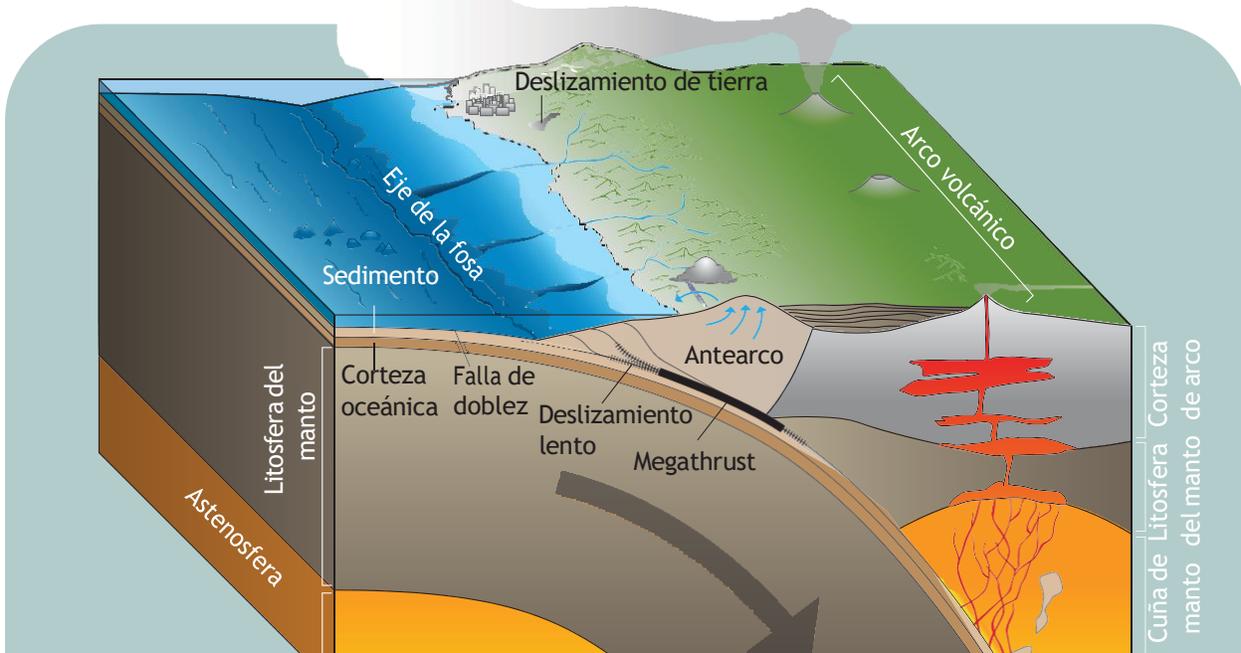


Figura S1-1. Representación de un sistema de subducción, que identifica muchos de los componentes analizados en este documento. Se crea una zona de subducción donde convergen dos placas, con una hundiéndose en el manto. La subducción conecta características de la placa entrante a la dinámica a lo largo de la interfaz de la placa que crean terremotos: generación de magma sobre la losa en hundimiento a erupciones explosivas, y creación de topografía en la placa superior a deslizamientos de tierra y sedimentos que se alimentan de nuevo a la zona de subducción. Figura recuperada del **documento de visión de SZ4D**

En las zonas de subducción, convergen dos placas tectónicas y una se empuja debajo de la otra. Estos ajustes presentan profundos peligros geológicos. Los terremotos más grandes de la Tierra se generan en el contacto entre estas dos placas tectónicas, y el movimiento resultante en el fondo marino desencadena grandes tsunamis. Las cadenas de volcanes activos se forman a lo largo de las zonas de subducción, muchos de los cuales son capaces de generar erupciones explosivas. Estos entornos activos sísmica y volcánicamente crean relieves dinámicos que pueden producir deslizamientos de tierra catastróficos. Los grandes centros de población de todo el mundo se encuentran a lo largo de zonas de subducción y, por lo tanto, se exponen inmediatamente a los peligros que representan, incluso dentro de los Estados Unidos. El noroeste del Pacífico sufrió un terremoto a escala del terremoto de Tōhoku de 2011 hace 323 años y es capaz de albergar terremotos futuros de este tamaño. La próxima erupción importante del monte Rainier tiene el potencial de devastar los principales centros urbanos del estado de Washington. Los grandes deslizamientos de tierra, como el evento de 2014 cerca de Oso, Washington, son algo común en el noroeste del Pacífico, Alaska y Puerto Rico. Aún más personas son vulnerables a los efectos de campo lejano de los peligros de la zona de subducción, como se ilustra dolorosamente por el tsunami producido por el terremoto de Sumatra M9.1 de 2004. A pesar de la enorme importancia social de estos peligros para muchos, los procesos físicos y químicos básicos que controlan la ocurrencia y magnitud de estos eventos naturales siguen siendo poco conocidos. El propósito de SZ4D es proporcionar una nueva perspectiva transformadora de los controles sobre los procesos fundamentales subyacentes a estos peligros.