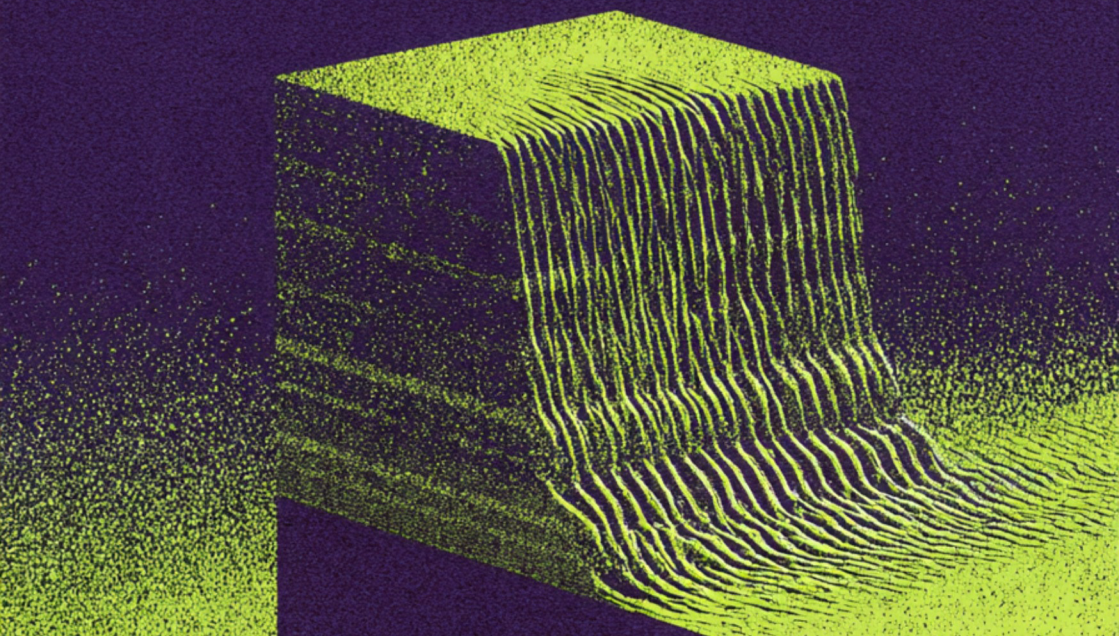
Religación
Press

Enrique Francisco Luján Silva · Jorge Elías Domingo Alva Hurtado
María Amelia León Torres de Luján · Guillermo David Evangelista Benites
Antonio Manuel Otoya Zelada

MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DEL DISTRITO DE TRUJILLO



Enrique Francisco Luján Silva, Jorge Elías Domingo Alva Hurtado,
María Amelia León Torres de Luján, Guillermo David Evangelista
Benites, Antonio Manuel Otoya Zelada

Microzonificación sísmica del distrito de Trujillo

Religación **P**ress
[Ideas desde el Sur Global]

[EN]

Seismic microzonation of the Trujillo district

[PT]

Microzonificação sísmica do distrito de Trujillo

Religación **P**ress

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial
Editorial team

Ana B. Benalcázar
Editora Jefe / Editor in Chief
Felipe Carrión
Director de Comunicación / Scientific Communication Director
Melissa Díaz
Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator
Sarahi Licango Rojas
Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial
Editorial Board

Jean-Arsène Yao
Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova
Fabiana Parra
Frisa María Antonieta Aliaga Guevara
Mateus Gamba Torres
Siti Mistima Maat
Nikoleta Zampaki
Silvina Sosa
Víctor Ancajima Miñán

Religación Press, es parte del fondo editorial del Centro de Investigaciones CICSHAL-RELIGACIÓN | Religación Press, is part of the editorial collection of the CICSHAL-RELIGACIÓN Research Center |

Diseño, diagramación y portada | Design, layout and cover: Religación Press.
CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.
Correo electrónico | E-mail: press@religacion.com
www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en | Available for free download at
https://press.religacion.com

Este título se publica bajo una licencia de Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
This title is published under an Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) license.

El presente libro tiene el aval del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina - CICSHAL.

Título: Microzonificación sísmica del distrito de Trujillo

Derechos de autor | Copyright: Enrique Francisco Luján Silva, Jorge Elías Domingo Alva Hurtado, María Amelia León Torres de Luján, Guillermo David Evangelista Benites, Antonio Manuel Otoya Zelada

Primera Edición | First Edition: 2026

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 624 - Ingeniería civil

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: RBG - Geología, geomorfología y la litosfera | RBP - Meteorología y climatología | TNCC - Mecánica de suelos y rocas

BISAC: SCI032000

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Ingeniería

Soporte| Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2026-10-21

ISBN: 978-9907-845-29-7

[APA 7]

Luján Silva, E. F., Alva Hurtado, J. E. D., León Torres de Luján, M. A., Evangelista Benites, G. D., & Otoya Zelada, A. M. (2026). *Microzonificación sísmica del distrito de Trujillo.* Religación Press. https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.500

Revisión por pares

El presente libro constituye el resultado de un riguroso proceso de investigación académica, cuya calidad metodológica y solidez argumental han sido validadas mediante un sistema de revisión por pares externos implementado bajo el protocolo de doble ciego, bajo la supervisión del Centro de Investigaciones en Ciencias y Humanidades desde América Latina (CICSHAL). Como garantía de transparencia y rigor científico, los informes de evaluación realizados por los especialistas designados se conservan en el archivo institucional de la editorial, a disposición de las instancias que así lo requieran.

Peer Review

This book is the result of a rigorous academic research process, whose methodological quality and argumentative solidity have been validated through an external peer-review system implemented under a double-blind protocol, under the supervision of the Center for Research in Sciences and Humanities from Latin America (CICSHAL). As a guarantee of transparency and scientific rigor, the evaluation reports prepared by the designated specialists are preserved in the publisher's institutional archives, available to any party that may require them.

Sobre los autores

ABOUT THE AUTHORS

Enrique Francisco Luján Silva
Universidad Privada Antenor Orrego | Trujillo | Perú
https://orcid.org/0000-0001-8960-8810
elujans@upao.edu.pe
enriquegeo@hotmail.com
Ing. Civil, Mg. en Ciencias - Mención en Geotecnia, Dr. en Ciencias e Ingeniería, Post Doctor Internacional Investigador en Ingeniería e Innovación, Evaluador de Riesgos de Desastres Originados por Fenómenos Naturales, miembro RENACYT, decano CIP-CDLL.

Jorge Elías Domingo Alva Hurtado
Universidad Nacional de Ingeniería | Lima | Perú
https://orcid.org/0000-0001-9107-2218
jalvah@uni.edu.pe
jorgealvah@gmail.com
PhD en Ingeniería Civil graduado en la Universidad de Massachusetts USA, CE y MSCE graduado en el Instituto Tecnológico de Massachusetts. Profesor Principal, Ex decano y Ex rector de la UNI. Ex decano nacional del CIP.

María Amelia León Torres de Luján
Universidad Privada Antenor Orrego | Trujillo | Perú
https://orcid.org/0009-0001-1178-0642
mariontelolu@hotmail.com
Ingeniera de Sistemas de la Universidad Privada Antenor Orrego y maestrista en Ingeniería Ambiental.

Guillermo David Evangelista Benites
Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
https://orcid.org/0000-0002-1955-6565
gevangelista@unitru.edu.pe
david_gdeb@hotmail.com
Especialista en métodos numéricos, transferencia de calor, mecánica de fluidos y simulación de procesos. Doctor en Ciencias e Ingeniería. Miembro de RENACYT.

Antonio Manuel Otoya Zelada
Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú
https://orcid.org/0000-0001-6460-969X
amotoyaz@unitru.edu.pe
antonio_otoya@hotmail.com
Doctor en Ingeniería Química Ambiental, Título profesional de Ingeniero Químico, experiencia docente en la Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), área ciencias básicas y en la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), área de Ingeniería Química.

Resumen

Trujillo se levanta sobre un suelo que no es uno solo: arenas, arcillas y agua que responden de maneras distintas cuando llega un sismo. La microzonificación sísmica ordena esa diversidad en un mapa de zonas. Este libro examina qué hay detrás de ese mapa, cómo se construye la evidencia que lo sostiene y cuáles son sus límites. El recorrido muestra que la clasificación relativa entre zonas se sostiene sobre una convergencia de métodos independientes. Pero cuando el mapa pasa de ordenar a predecir, la certeza se desvanece: los valores absolutos dependen de supuestos que rara vez se declaran. La inversión de ondas no tiene solución única, el modelo de respuesta supone capas horizontales que la ciudad no siempre ofrece y la cadena de atenuación acumula incertidumbres.

Palabras clave
Microzonificación sísmica; incertidumbre; Trujillo; respuesta de sitio; planificación urbana.

Abstract

Trujillo stands on a ground that is not one but many: sands, clays, and water that respond differently when an earthquake arrives. Seismic microzonation sorts that diversity into a map of zones. This book examines what lies behind that map, how the evidence supporting it is built, and where its limits are. The journey shows that the relative classification between zones rests on a convergence of independent methods. But when the map moves from ordering to predicting, certainty fades: absolute values depend on assumptions that are rarely declared. Wave inversion has no unique solution, the response model assumes horizontal layers that the city does not always offer, and the attenuation chain accumulates uncertainties.

Keywords
Seismic microzonation; uncertainty; Trujillo; site response; urban planning.

Resumo

Trujillo se ergue sobre um solo que não é um só: areias, argilas e água que respondem de maneiras distintas quando chega um sismo. A microzonificação sísmica organiza essa diversidade em um mapa de zonas. Este livro examina o que há por trás desse mapa, como se constrói a evidência que o sustenta e quais são seus limites. O percurso mostra que a classificação relativa entre zonas se apoia em uma convergência de métodos independentes. Mas quando o mapa passa de ordenar a prever, a certeza se desvanece: os valores absolutos dependem de suposições que raramente se declaram. A inversão de ondas não tem solução única, o modelo de resposta supõe camadas horizontais que a cidade nem sempre oferece e a cadeia de atenuação acumula incertezas.

Palavras-chave
Microzonificação sísmica; incerteza; Trujillo; resposta de sítio; planejamento urbano.

CIUDAD SOBRE AGUA Y ARENA
El terreno que sostiene a Trujillo y sus zonas de sombra

Contenido

Revisión por pares 7
Peer Review 7
Sobre los autores 8
About the authors 8
Resumen 10
Abstract 11
Resumo 11

Capítulo 1 16
La ciudad que se construyó sobre arena y arcilla 16
1.1 Lo que el río Moche dejó 17
1.2 La ciudad que creció hacia el este 19
1.3 El suelo que amplifica 21
1.4 La falla que no se ve 23
1.5 La incertidumbre como punto de partida 25
1.6 La ciudad que no puede permitirse ignorar el agua 26
1.7 Lo que se sabe y lo que no 29
1.8 Lo que otros han aprendido midiendo el suelo 31
1.9 La ciudad que se conoce a medias 35

Capítulo 2 38
Los métodos de exploración y sus límites 38
2.1 La onda que viaja por la superficie 39
2.2 La inversión y sus muchas respuestas 42
2.3 Lo que la fuente no alcanza a ver 46
2.4 La calicata como ancla 49
2.5 La medición como construcción 51
2.6 La incertidumbre se puede medir: el giro bayesiano 53
2.7 La brecha entre métodos no es un error: es información 55
2.8 Lo que la norma asume y lo que el suelo ofrece 56
2.9 Lo que se puede afirmar y lo que no 58
2.10 La física de la dispersión, paso a paso 59
2.11 La no unicidad, con un ejemplo concreto 62

Capítulo 3 66
Los supuestos de la simulación y su efecto en los resultados 66
3.1 La columna que se supone infinita 67
3.2 La linealidad que se agota 71
3.3 La cadena de la atenuación 73
3.4 El espectro como promesa condicional 75
3.5 Lo que el modelo no puede ver 78
3.6 Lo que se puede y no se puede afirmar con un espectro 80
3.7 La topografía que el modelo no ve 81
3.8 La velocidad de la onda que el modelo supone 83
3.9 El agua que el modelo no incorpora 85
3.10 Lo que el modelo puede y no puede decir 87
3.11 La incertidumbre que se hereda 89

Capítulo 4 93
Conclusión. Usos y límites de la microzonificación sísmica 93
4.1 La clasificación relativa como certeza 94
4.2 El valor puntual como estimación 98
4.3 El margen que no se declara 100
4.4 Para qué sirve entonces 101
4.5 La frontera entre el mapa y el estudio de sitio 103
4.6 La incertidumbre como información pública 105
4.7 La responsabilidad del que produce y del que usa 106
4.8 Lo que se puede afirmar y lo que no 108
4.9 La agenda pendiente 109
4.10 La evidencia que converge: por qué el orden de las zonas no es una casualidad 111
4.11 El mapa en la planificación urbana: tres decisiones concretas 113
4.12 La responsabilidad institucional y los estándares de calidad 115
4.13 La decisión del ingeniero: qué hacer con el mapa 117
4.14 Lo que la microzonificación puede llegar a ser 119

Nota metodológica 122

Referencias 125

FIGURAS

Figura 1 45
Figura 2 48
Figura 3 78
Figura 4 96
Figura 5 97

Capítulo 1

La ciudad que se construyó sobre arena y arcilla

El 19 de febrero de 1619, un sismo destruyó Trujillo. El registro histórico le asigna una magnitud cercana a 8,4 Mw. La ciudad tardó años en reconstruirse. Cuatrocientos años después, el suelo sobre el que se levantó de nuevo sigue siendo el mismo: capas de arena eólica que el viento trajo del litoral, depósitos aluviales que el río Moche arrastró desde los Andes y arcillas que en algunos sectores aparecen a menos de un metro de la superficie. El terremoto de 1619 no fue el último. En 1725, otro sismo dañó edificios en la ciudad. En 1759, un temblor dejó cinco víctimas y averió construcciones. En 1937, un movimiento de intensidad VII en la escala Mercalli provocó la caída de cornisas y rajaduras en las paredes de Trujillo. La ciudad ha temblado antes. Y volverá a temblar.

Lo que ha cambiado no es el suelo. Es lo que se construyó encima.

1.1 Lo que el río Moche dejó

El valle donde se asienta Trujillo es el producto de dos fuerzas que han trabajado durante milenios. Una es el agua: el río Moche y las quebradas que bajan de los cerros durante los eventos de El Niño han depositado capas de grava, arena y limo en abanicos que se extienden desde las estribaciones andinas hasta el mar. La otra es el viento: las corrientes que soplan desde el litoral han acumulado

mantos de arena fina sobre las terrazas aluviales, cubriendo parcialmente lo que el río dejó antes.

El resultado es un subsuelo heterogéneo. En la zona central del distrito, la exploración geotécnica encuentra arenas pobremente graduadas, de compacidad media a densa, que en algunos puntos alcanzan los tres metros de profundidad sin cambios significativos. Hacia el este, en urbanizaciones como Santa María V Etapa o Las Casuarinas, aparecen arcillas de baja a mediana plasticidad, con presencia de gravas menudas dispersas. Y en la franja costera, entre Huanchaco y Salaverry, los depósitos marinos de arena fina se mezclan con restos de conchas y material orgánico.

La diferencia importa. Un suelo granular denso transmite las ondas sísmicas de una manera. Una arcilla blanda, saturada de agua, las amplifica. La distinción no es académica: en 1937, los daños en Trujillo se concentraron en las construcciones más vulnerables, pero el tipo de suelo bajo cada edificio también influyó en cómo se sintió el movimiento. Dos casas a cien metros de distancia pueden responder de forma distinta al mismo sismo si una está sobre arena compacta y la otra sobre arcilla saturada.

El agua subterránea añade una variable que no siempre se considera. En Las Casuarinas, el nivel freático aparece a 3,30 metros de profundidad. En Santa María V Etapa,

a 1,20. En Huanchaco, a 2,50. La presencia de agua en los poros del suelo cambia su comportamiento frente a las ondas sísmicas. Los estudios de centrífuga han mostrado que un suelo parcialmente saturado responde de manera distinta a uno completamente saturado, y que asumir saturación total en el diseño puede sobreestimar o subestimar diferentes aspectos de la respuesta. En Trujillo, donde el nivel freático varía de un punto a otro en pocos metros, esa distinción es relevante.

1.2 La ciudad que creció hacia el este

A comienzos del siglo XX, Trujillo era una ciudad compacta, de pocas manzanas alrededor de la plaza de armas y el mercado central. El crecimiento hacia el este y el sur comenzó en la segunda mitad del siglo, cuando las tierras agrícolas que rodeaban el casco urbano se parcelaron para urbanizaciones. El proceso no fue planificado en función de las condiciones del suelo. Fue, como en muchas ciudades latinoamericanas, una ocupación guiada por la disponibilidad de tierra y la presión demográfica.

Las urbanizaciones que hoy ocupan el distrito se distribuyen sobre suelos distintos. Miraflores, Santo Domingo, Andrés Rázuri y Aranjuez se asientan sobre las arenas y gravas que el río Moche depositó en su abanico aluvial. La capacidad portante en esa zona, calculada a partir de cali-

catas y ensayos de penetración, varía entre 1,10 y 1,53 kilogramos por centímetro cuadrado para una cimentación corrida de sesenta centímetros de ancho. Son los valores más altos del distrito.

Santa María V Etapa, Las Casuarinas, Los Laureles y Villa El Contador ocupan una franja donde las arcillas aparecen a poca profundidad. La capacidad portante allí desciende a valores entre 0,79 y 0,94 kilogramos por centímetro cuadrado. La diferencia no es menor: una estructura que en la primera zona se sostiene con una cimentación convencional puede requerir un diseño distinto en la segunda. Y el nivel freático, que en Las Casuarinas se encuentra a 3,30 metros, en Santa María V Etapa sube hasta 1,20.

Entre ambos extremos hay dos zonas intermedias. La Zona II, donde se ubican Monserrate, San Andrés, UPAO y El Galeno, presenta arenas pobremente graduadas con presencia de limos y gravas aisladas. La Zona III, que incluye el Centro Histórico, Covicorti, Las Quintanas y El Recreo, se asienta sobre arenas y arenas limosas de compacidad variable. Cada una tiene su propio rango de capacidad portante y su propio período de vibración dominante.

La historia de la expansión urbana de Trujillo no ha sido la historia de una ciudad que eligió sus suelos. Ha sido la historia de una ciudad que creció sobre los suelos que encontró.

1.3 El suelo que amplifica

Un sismo no sacude el suelo de la misma manera en todas partes. La energía que libera una falla en la costa viaja como ondas elásticas a través de la corteza. Cuando esas ondas llegan a la superficie, atraviesan primero el basamento rocoso —un material rígido, de alta velocidad— y luego las capas de suelo que se depositaron encima. Ese tránsito de un medio rígido a uno blando produce un efecto de amplificación.

El fenómeno tiene una explicación física sencilla. Las ondas sísmicas viajan más despacio en materiales blandos que en rocas duras. Cuando la energía entra en una capa blanda, la velocidad de propagación disminuye, pero la energía no desaparece: se concentra. El resultado es que la superficie del suelo se mueve más de lo que se movería la roca subyacente si estuviera expuesta. La amplificación puede ser de dos, tres, cinco veces.

La magnitud de esa amplificación depende de dos factores. El primero es el contraste de rigidez entre la capa blanda y el basamento. Cuanto más blando es el suelo respecto de la roca, mayor es la amplificación. El segundo es el espesor de la capa blanda. Una capa delgada amplifica menos que una gruesa, pero también lo hace en un rango de frecuencias distinto.

En Trujillo, la exploración geofísica con métodos de ondas superficiales ha permitido estimar la velocidad de propagación de las ondas de corte en los primeros treinta metros de profundidad. En la zona de Miraflores, esa velocidad es de 354 metros por segundo en promedio para los primeros treinta metros. En Los Cedros, de 390. En Santa María V Etapa, de 346. En el Centro Histórico, de 358. Son valores que clasifican los suelos como rígidos o muy densos según los estándares internacionales.

Pero la velocidad promedio oculta una estratificación que importa. En los primeros ocho metros, la velocidad puede ser de 188 a 300 metros por segundo. Entre los ocho y los dieciséis, sube a 300 o 476. Entre los dieciséis y los treinta, alcanza valores de 453 a 633. El suelo no es uniforme. La amplificación no ocurre en toda la columna por igual: se concentra en las capas más blandas, las más superficiales, las que están más cerca de donde vive la gente.

El período dominante del suelo —el tiempo que tarda una onda en recorrer la columna y volver— es el parámetro que conecta esa estratificación con el tipo de edificaciones que pueden verse más afectadas. Un suelo con período de 0,10 segundos amplifica las ondas de alta frecuencia, que afectan a estructuras rígidas y de poca altura. Un suelo con período de 0,50 segundos amplifica las ondas de baja frecuencia, que afectan a edificios altos y flexibles. En Trujillo, los períodos varían de 0,10 a 0,20 segundos en la

Zona I, de 0,20 a 0,30 en la Zona II, de 0,30 a 0,40 en la Zona III y de 0,40 a 0,50 en la Zona IV.

La ciudad tiene, en un área de pocos kilómetros, suelos que responden a frecuencias distintas. Un edificio de cinco pisos en el Centro Histórico y otro idéntico en Santa María V Etapa no sentirán el mismo sismo de la misma manera.

1.4 La falla que no se ve

La costa peruana es una de las zonas sísmicas más activas del mundo. La placa de Nazca se hunde bajo la placa Sudamericana a una velocidad de aproximadamente seis centímetros por año. Ese movimiento no es continuo: las placas se traban en algunos segmentos y acumulan esfuerzo durante décadas o siglos. Cuando el esfuerzo supera la resistencia de la roca, la ruptura libera energía en forma de sismo.

Los sismos que se generan en la interfaz entre ambas placas se llaman de interfase. Ocurren a profundidades de entre veinte y sesenta kilómetros, frente a la costa, y pueden alcanzar magnitudes de 8 o más. Los sismos de intraplaca, en cambio, ocurren dentro de una de las placas, a mayor profundidad, y aunque son menos frecuentes, también pueden ser destructivos. La región de Trujillo se

encuentra en una zona donde ambos tipos de sismos son posibles.

El registro histórico de la ciudad es incompleto, pero suficiente para establecer un patrón. El sismo de 1619, con magnitud estimada de 8,4, destruyó la ciudad. El de 1725, con magnitud cercana a 7,8, causó daños severos. El de 1759, con magnitud similar, dejó cinco víctimas y averió edificios. En 1937, un sismo de intensidad VII en la escala Mercalli provocó caída de cornisas y rajaduras en paredes. En 1951, otro movimiento alcanzó intensidad V en Trujillo.

La recurrencia de sismos grandes en la región no es regular. Pueden pasar décadas sin un evento significativo, y luego ocurrir varios en un período corto. Esa irregularidad es parte del problema: la memoria colectiva se debilita, las normas de construcción se relajan, y la ciudad se expande sobre suelos que no han sido estudiados con el detalle necesario.

La microzonificación sísmica intenta llenar ese vacío. No predice cuándo ocurrirá el próximo sismo. No puede hacerlo. Lo que hace es caracterizar cómo responderá el suelo cuando ocurra, para que las decisiones de planificación urbana y diseño estructural se tomen con información sobre el terreno y no a ciegas.

1.5 La incertidumbre como punto de partida

La caracterización del suelo de Trujillo que se presenta en este capítulo no es una descripción cerrada. Es una aproximación. Los valores de velocidad de onda, los períodos dominantes y las capacidades portantes que se han mencionado provienen de métodos que tienen límites, y reconocer esos límites es parte de entender lo que los datos dicen.

Un perfil de velocidades de ondas de corte obtenido por métodos geofísicos es el resultado de un proceso de inversión. Se mide una curva de dispersión —cómo varía la velocidad de fase con la frecuencia— y se busca un modelo de capas que reproduzca esa curva. El problema es que distintos modelos pueden ajustar igual de bien los mismos datos. La solución no es única. Un perfil que asigna 354 metros por segundo a los primeros treinta metros y otro que asigna 380 pueden ser igualmente compatibles con la curva medida.

Esa no unicidad no invalida el método. Lo que hace es acotar lo que se puede afirmar. Decir que el suelo de Miraflores tiene una velocidad media de 354 metros por segundo es una estimación, no una medición directa. La diferencia importa cuando esa cifra se usa para clasificar el suelo según una norma o para calcular una amplificación esperada.

La comparación con métodos directos —calicatas, ensayos de penetración— ayuda a acotar la incertidumbre, pero no la elimina. Una calicata de tres metros de profundidad ofrece información detallada de los primeros metros, pero no dice nada de lo que hay a treinta. Un ensayo de penetración estándar mide la resistencia a la penetración, que se correlaciona con la rigidez, pero la correlación no es perfecta. Cada método ve una parte del problema. Ninguno lo ve todo.

1.6 La ciudad que no puede permitirse ignorar el agua

Hay un factor que complica cualquier lectura del subsuelo de Trujillo y que no aparece en los mapas de zonificación sísmica tradicionales: el agua. No el agua de lluvia, que en esta costa desértica es escasa, sino el agua subterránea que satura los poros del suelo y que en algunos sectores del distrito se encuentra a menos de dos metros de la superficie.

En Santa María V Etapa, el nivel freático aparece a 1,20 metros. En Las Casuarinas, a 3,30. En Huanchaco, a 2,50. La diferencia entre estos valores no es un detalle técnico para especialistas. Un suelo granular saturado se comporta de manera distinta frente a un sismo que el mismo suelo seco. La presión del agua en los poros reduce la tensión

efectiva entre las partículas, y esa reducción puede llevar, en condiciones extremas, a la licuación: el suelo pierde su capacidad de soportar carga y se comporta como un líquido. En 1964, el terremoto de Niigata, en Japón, mostró al mundo lo que la licuación puede hacerle a una ciudad: edificios completos inclinándose sobre sus cimientos, alcantarillas emergiendo del pavimento, puentes partidos en dos.

En Trujillo, el riesgo de licuación no ha sido evaluado con el detalle que merece. Los estudios de microzonificación que se han realizado en el distrito se centran en la amplificación sísmica y en la capacidad portante, pero la licuación requiere otro tipo de análisis: la densidad relativa del suelo, la profundidad del nivel freático, la granulometría, la historia de cargas. Ninguno de estos parámetros se ha integrado en un mapa de susceptibilidad. La información existe de manera fragmentada —los ensayos de penetración estándar dan el número de golpes, las calicatas dan la granulometría, los sondajes dan el nivel freático—, pero no se ha articulado en una evaluación específica.

La elevación del nivel freático en algunos sectores de la ciudad agrava la situación. El documento de riesgo de terremoto y tsunami de Trujillo y Chan Chan, elaborado por el Centro de Investigaciones y Proyectos de La Libertad, señala que el riesgo sísmico en Trujillo se ha incrementado debido a la elevación del nivel freático. Las causas de

esa elevación no se detallan en ese documento, pero en una ciudad que riega parques y jardines con agua potable, que tiene pérdidas en la red de distribución y que en algunos sectores carece de alcantarillado, la infiltración es una hipótesis razonable. El resultado es que el suelo que ya era blando se vuelve, además, más saturado.

El agua subterránea también importa para los tsunamis. Trujillo tiene cinco eventos de tsunamis registrados en los dos últimos siglos, según el Sistema Nacional de Información Ambiental. Los más documentados son los de 1619, 1725 y 1759, todos asociados a sismos destructivos. El de 1619 fue particularmente severo: la ciudad quedó destruida y, según registros citados en el plan de preparación de Víctor Larco, el tsunami asociado causó la muerte del 96 por ciento de sus habitantes —de 3.000 personas, sobrevivieron aproximadamente 200. Esa cifra, aunque proviene de fuentes históricas que pueden tener imprecisiones, da una idea de la magnitud del evento.

Las áreas potenciales de riesgo de tsunami se ubican en los distritos costeros: Víctor Larco, con el balneario de Buenos Aires; Moche, con Las Delicias; Huanchaco; y Salaverry. En estas zonas, la combinación de suelo blando, nivel freático alto y proximidad al mar configura una triple exposición que los mapas de microzonificación sísmica, centrados en la amplificación del movimiento del suelo, no capturan por completo.

1.7 Lo que se sabe y lo que no

La caracterización del subsuelo de Trujillo que se ha presentado en las páginas anteriores no es una descripción cerrada. Es un mapa con zonas de nitidez variable. En algunos sectores, la información es densa: las urbanizaciones del centro y del este tienen calicatas, ensayos de penetración, perfiles geofísicos. En otros, la información es escasa o nula. La ciudad se conoce a sí misma de manera desigual.

Los valores de capacidad portante que se han mencionado —1,10 a 1,53 kilogramos por centímetro cuadrado en la Zona I, 0,79 a 0,94 en la Zona IV— provienen de cálculos que suponen una cimentación corrida de sesenta centímetros de ancho y una profundidad de desplante de setenta a noventa centímetros. Son valores de referencia, no verdades absolutas. Cambiar el tipo de cimentación, el ancho, la profundidad, cambia el resultado. Y el cálculo de capacidad portante, por sofisticado que sea, siempre es una aproximación: la teoría de Terzaghi, que es la que se usa convencionalmente, supone un suelo homogéneo, isotrópico, con una superficie de falla bien definida. El suelo real de Trujillo tiene gravas dispersas, lentes de arena, intercalaciones de arcilla. La homogeneidad es una simplificación.

Los períodos dominantes del suelo —0,10 a 0,20 segundos en la Zona I, 0,40 a 0,50 en la Zona IV— son igualmente estimaciones. Provienen de la integración de perfiles de velocidad de ondas de corte, y esos perfiles, como se ha señalado, son el resultado de un proceso de inversión que no tiene solución única. Un modelo distinto de capas podría producir un período dominante distinto sin contradecir los datos de campo.

Nada de esto invalida el esfuerzo de caracterización. Lo que hace es delimitar lo que se puede afirmar con certeza y lo que se afirma con un margen de error que rara vez se explicita. La distinción importa porque las decisiones de planificación urbana y de diseño estructural se toman sobre la base de estos números. Un mapa que dice "Zona IV: período de 0,40 a 0,50 segundos" es útil para priorizar. Un mapa que dice "Zona IV: período de 0,45 segundos" es una precisión que los datos no sostienen.

La ciudad que se construyó sobre arena y arcilla es, en este sentido, una ciudad que se conoce a sí misma con una confianza que no siempre está justificada por la calidad de la evidencia. Reconocer esa brecha no es un ejercicio de escepticismo estéril. Es la condición para usar la información de manera responsable.

1.8 Lo que otros han aprendido midiendo el suelo

La microzonificación sísmica no nació en Trujillo. Tampoco en el Perú. La práctica de dividir una ciudad en zonas según cómo responde su suelo a un sismo tiene décadas de historia en América Latina, y las lecciones de esas experiencias iluminan lo que se puede y no se puede esperar de un mapa de cuatro colores.

Lima fue pionera. En la década de 1970, ingenieros peruanos desarrollaron un método de microzonificación que integraba no solo sismos, sino también inundaciones, deslizamientos y tsunamis. La lógica era simple y ambiciosa a la vez: una ciudad no enfrenta un solo peligro, y planificar el territorio exige mirar el conjunto. Ese enfoque se simplificó después para aplicarlo en comunidades pequeñas y medianas, y en las décadas siguientes se perfeccionó con estudios de caso como los terremotos de Chile y México y el flujo de lodo del volcán Nevado del Ruiz, que sepultó Armero en 1985.

La experiencia limeña continuó. El CISMID, el centro peruano-japonés de investigación sísmica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ha producido estudios de microzonificación para distritos específicos: San Borja en 2019, San Miguel en 2015, Callao en 2021, La Molina en 2010, Ventanilla en 2012. Cada uno combina geología, geotecnia

y geofísica. Cada uno produce un mapa. Y cada uno, al leerlo con atención, revela lo mismo que el caso de Trujillo: que el mapa es tan bueno como los datos que lo sostienen.

Un estudio reciente de los distritos de La Perla y San Miguel, publicado en 2025 en la revista *Tecnia*, ilustra el estándar actual. El equipo recopiló información geológica, geotécnica y geofísica, ejecutó ensayos, procesó datos y elaboró mapas de isoperíodos, Vs30 y microzonificación. Identificaron cinco zonas con períodos fundamentales menores a 0,20 segundos. La Zona I, con grava a tres metros de profundidad y Vs30 entre 450 y 700 metros por segundo, es la más favorable. La Zona V, material de relleno de playa, es la más problemática. El resultado no es una descripción del suelo por el suelo mismo. Es una herramienta para el diseño sismorresistente.

En México, Guadalajara enfrenta un problema distinto pero comparable. La ciudad está construida sobre depósitos de piedra pómez, un material frágil que los ensayos geotécnicos convencionales no logran caracterizar bien. Un equipo de la UNAM y otras instituciones optó por métodos de ondas superficiales —MASW y refracción de microtremores— en 33 sitios para definir la clasificación del suelo en términos de Vs30, la profundidad del basamento y el período fundamental. El resultado fue un mapa de cuatro zonas geotécnicas que, superpuesto a los sistemas

constructivos de la ciudad, reveló una vulnerabilidad alta a la resonancia en edificios de adobe y mampostería no reforzada de uno a cuatro pisos en las zonas II y III. El dato importa: no basta con saber cómo responde el suelo. Hay que cruzarlo con lo que se construyó encima.

Caracas ofrece otra lección. La ciudad fue golpeada por un sismo de magnitud 6,6 en 1967 que evidenció efectos de sitio fuertes en el valle sedimentario. El proyecto de microzonificación formal se desarrolló entre 2005 y 2009. La metodología incluyó evaluación probabilística del peligro sísmico en roca, identificación de efectos de sitio y definición de microzonas de respuesta similar. Los resultados principales fueron espectros de respuesta para distintas condiciones de subsuelo y estimación de peligro de deslizamiento en laderas. La microzonificación de Caracas no se quedó en el mapa: se convirtió en insumo para la reducción del riesgo.

Hay un hilo común en estas experiencias. La microzonificación sísmica, cuando se hace con rigor, produce mapas que son útiles para priorizar. Pero también produce mapas que, leídos con honestidad, muestran sus propios bordes. Un estudio de 2025 sobre San Juan de Miraflores, en Lima, encontró cuatro zonas con períodos que van de menos de 0,2 segundos a 0,41 segundos. La Zona V, de rellenos antrópicos no controlados, presentó un Vs30 de 224 metros por segundo y una clasificación S2. El equi-

po concluyó que era necesario “investigar a profundidad la manera de compatibilizar el uso del Vs30 y el período predominante para la clasificación sísmica de sitio”. Es decir: los dos parámetros que la norma usa para clasificar el suelo no siempre coinciden. Y cuando no coinciden, la clasificación se vuelve una decisión, no una lectura automática de los datos.

Esa es la lección que Trujillo comparte con Lima, con Guadalajara, con Caracas. La microzonificación no elimina la incertidumbre. La organiza. Convierte un territorio continuo y heterogéneo en un conjunto finito de zonas, y al hacerlo necesariamente simplifica. La pregunta no es si simplifica —siempre lo hace—, sino si la simplificación es razonable para el uso que se le dará.

El desarrollo metodológico reciente apunta en una dirección que Trujillo aún no ha incorporado: la cuantificación explícita de la incertidumbre. Un estudio de 2026 sobre la isla de Penang, en Malasia, utilizó redes neuronales bayesianas para estimar Vs30 a partir de mediciones de microtremores de una sola estación. El modelo no solo predice el valor, sino que calibra intervalos de confianza. Los autores argumentan que esa información “permite a los profesionales interpretar la clasificación de sitio basada en Vs30 de manera informada por el riesgo, evitando decisiones de zonificación excesivamente confiadas en áreas con restricciones limitadas”. La idea es simple y poderosa:

un mapa que dice “aquí el Vs30 es 350, más o menos 50” es más útil que uno que dice “aquí el Vs30 es 350”, porque el primero permite saber cuándo se está cerca de un umbral normativo y cuándo no.

En el Perú, esa práctica aún no se ha generalizado. Los estudios de microzonificación del CISMID y de las universidades producen mapas con valores puntuales. La incertidumbre se reconoce en el texto, a veces, pero no se cuantifica ni se representa cartográficamente. El resultado es que el usuario del mapa —un ingeniero, un planificador urbano, un funcionario municipal— recibe una imagen más nítida de lo que los datos permiten.

Trujillo no es una excepción en ese sentido. Es la regla. Y esa es, precisamente, la razón por la que vale la pena mirar lo que se ha hecho en otros lugares: no para copiar mapas, sino para entender qué preguntas hacerle al propio.

1.9 La ciudad que se conoce a medias

Volvamos al suelo. Volvamos a la arena que el viento trajo del litoral, a la arcilla que el río Moche depositó en su abanico aluvial, al agua que en algunos sectores aparece a 1,20 metros y en otros a 3,30. Volvamos a las cuatro zonas que los estudios han delimitado, a los períodos que van de 0,10 a 0,50 segundos, a las capacidades portantes que oscilan entre 0,79 y 1,53 kilogramos por centímetro cuadrado.

Ese es el material. Es un material heterogéneo, discontinuo, a veces bien caracterizado y a veces no. Y sobre ese material se ha construido una ciudad.

La microzonificación sísmica de Trujillo, como la de Lima, como la de Guadalajara, como la de Caracas, es un intento de hacer visible lo que está debajo. No es un mapa del futuro. No dice qué edificio se caerá ni cuándo. Dice, con mayor o menor precisión, cómo tiembla el suelo en cada zona cuando llega una onda sísmica. Y esa información, si se usa con conciencia de sus límites, puede marcar la diferencia entre una ciudad que se prepara y una que espera.

La diferencia entre una zona de período 0,10 segundos y otra de 0,50 no es una curiosidad académica. Es la diferencia entre un suelo que amplifica las ondas de alta frecuencia y uno que amplifica las de baja. Es la diferencia entre un edificio de cinco pisos que vibra con el suelo y otro que vibra contra él. Es la diferencia, en última instancia, entre una estructura que resiste y una que colapsa.

Trujillo tiene ambas zonas. Y tiene urbanizaciones en ambas. La ciudad que se construyó sobre arena y arcilla no eligió sus suelos. Pero puede elegir cómo construir sobre ellos.

Capítulo 2

Los métodos de exploración y sus límites

En Los Cedros, una línea de 53 metros y 24 geófonos registró durante unos segundos el paso de ondas superficiales producidas por un golpe controlado, y el procesamiento de esa señal arrojó un número que parecía definitivo: 390 metros por segundo para los primeros treinta metros de suelo, un valor que clasifica el terreno como Tipo C según la norma peruana. Un modelo de inversión distinto, aplicado a la misma curva de dispersión y con supuestos igualmente razonables, podría haber entregado 350 metros por segundo y una clasificación Tipo D, sin que el suelo hubiera cambiado en absoluto y sin que ninguno de los dos resultados pudiera declararse erróneo. La distancia entre el dato y la inferencia recorre este capítulo entero, porque medir la velocidad de las ondas sísmicas no consiste en leer un instrumento sino en construir un modelo a partir de una respuesta indirecta, y todo modelo tiene márgenes que rara vez se declaran y que casi nunca se cuantifican.

2.1 La onda que viaja por la superficie

Cuando una fuente golpea el suelo, genera dos familias de ondas que se comportan de maneras muy distintas: las ondas de cuerpo, compresionales y de corte, viajan a través del material y transportan energía hacia el interior, mientras que las ondas superficiales se propagan por la interface entre el suelo y el aire y su energía decae con

la profundidad. La más estudiada de estas últimas es la onda Rayleigh, cuyo movimiento elíptico fue descrito matemáticamente por John William Strutt, lord Rayleigh, en 1885, y cuya propiedad más útil para explorar el subsuelo es la dispersión: las componentes de alta frecuencia viajan por las capas superficiales mientras que las de baja frecuencia penetran más y sienten las capas profundas, de modo que la velocidad de fase resulta un promedio ponderado de las velocidades de las capas que la onda atraviesa. Al medir cómo varía esa velocidad con la frecuencia se obtiene una curva de dispersión, y esa curva es el dato bruto a partir del cual se construye el perfil de velocidades, que es la interpretación y no el dato mismo.

La dispersión no siempre es limpia, y un estudio con arreglos lineales en la costa peruana encontró que en suelos con contraste de rigidez abrupto la curva puede presentar saltos que no corresponden a una capa real sino a la interferencia de modos superiores, y los autores advirtieron que ignorar esa interferencia lleva a sobreestimar la velocidad de las capas profundas. La observación importa porque el perfil depende de qué modos se identifiquen como fundamentales y cuáles se descarten, y esa decisión no es automática sino que involucra criterios que el procesamiento aplica y que rara vez se reportan con el detalle necesario para evaluar su efecto. La profundidad que alcanza la onda depende de su longitud de onda, y con

fuentes activas y arreglos de decenas de metros la exploración confiable llega a los treinta metros; más allá la señal se debilita y en Trujillo los perfiles reportados cubren exactamente esos primeros treinta metros, de modo que lo que hay debajo es una extrapolación que se apoya en el supuesto de que la velocidad sigue aumentando con la profundidad.

La física de la dispersión tiene una consecuencia que a veces se pasa por alto y que conviene explicitar: la curva que se mide en superficie no es una propiedad del suelo sino una propiedad del sistema suelo-fuente-receptor, y cambiar la fuente, la distancia entre geófonos o la orientación de la línea produce curvas distintas sin que el suelo haya cambiado. Un trabajo de 2020 sobre la incertidumbre en la curva de dispersión mostró que en suelos con capas de espesor variable la curva medida puede desplazarse en frecuencia según la posición de la fuente, y el desplazamiento no es un error de medición sino una consecuencia de que la onda muestrea un volumen de suelo que no es homogéneo, de modo que la curva es un promedio y todo promedio depende de la distribución de lo promediado. La distinción entre modos fundamentales y superiores añade otra capa de complejidad porque en un medio estratificado la onda Rayleigh tiene múltiples modos de propagación, el fundamental es el que tiene la velocidad más baja para una frecuencia dada y los superiores viajan más rápido, y en la práctica la curva que se extrae de un regis-

tro de campo puede ser una mezcla cuya separación no es trivial y depende del algoritmo que se use.

Un estudio de 2021 comparó los resultados de tres algoritmos aplicados al mismo conjunto de datos y encontró diferencias de hasta un quince por ciento en la velocidad de fase en el rango de cinco a diez hercios, y las diferencias no se debían a errores de implementación sino a que cada algoritmo resuelve el problema de separación de modos de manera distinta, de modo que el dato no es único sino el resultado de un proceso que involucra decisiones. Esa constatación tiene una implicación práctica que conviene subrayar: la curva de dispersión que se usa como entrada para la inversión no es un dato bruto sino un dato procesado, y el procesamiento involucra elecciones que no siempre se reportan y que sin embargo condicionan el resultado final, de manera que dos equipos que trabajen sobre el mismo registro pueden obtener curvas distintas y perfiles distintos sin que ninguno de los dos esté equivocado.

2.2 La inversión y sus muchas respuestas

El proceso que convierte una curva de dispersión en un perfil de capas se llama inversión, y consiste en proponer un modelo de espesores y velocidades, calcular la curva que ese modelo produciría, compararla con la medida

y ajustar el modelo hasta que la diferencia sea pequeña; el problema es que la inversión de ondas superficiales es un problema no lineal con múltiples soluciones, y distintos modelos reproducen la misma curva con diferencias que caen dentro del error de medición sin que haya un criterio objetivo para elegir entre ellos. Un estudio de 2009 mostró que esa no unicidad no es un detalle matemático sino que al propagar los modelos equivalentes a un análisis de respuesta sísmica las diferencias en la amplificación calculada pueden ser considerables, de modo que el perfil que se elige entre varios igualmente plausibles condiciona el resultado final y la decisión de elegir uno en lugar de otro no está justificada por los datos.

Un trabajo de 2026 cuantificó la brecha al comparar perfiles de MASW y ensayos de penetración estándar y encontró que las correlaciones empíricas entre el número de golpes y la velocidad de onda de corte fallan cuando el suelo presenta estratificación irregular o modos superiores de Rayleigh, y la conclusión fue que la clasificación de sitio basada solo en MASW sin verificación con métodos directos puede desviarse de la clasificación normativa. La práctica internacional ha empezado a incorporar la incertidumbre en el producto, y un estudio de 2026 en la isla de Penang utilizó redes neuronales bayesianas para estimar Vs30 a partir de microtremores de una sola estación y entregó junto con el valor central intervalos de confianza

calibrados, y los autores sostienen que esa información permite interpretar la clasificación de sitio de manera informada por el riesgo evitando decisiones de zonificación excesivamente confiadas en áreas con restricciones limitadas. En el Perú la práctica dominante sigue siendo el valor puntual y los estudios de microzonificación de los distritos de Lima publicados en la última década reportan Vs30 sin intervalo ni análisis de sensibilidad, de modo que la incertidumbre se menciona en el texto si acaso pero no se cuantifica ni se cartografía.

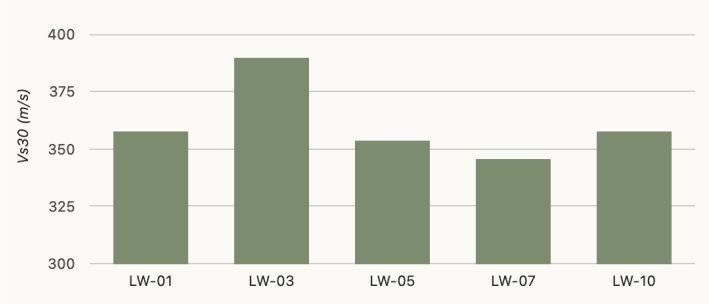
La no unicidad tiene una consecuencia práctica que conviene explicitar con un ejemplo sencillo: si dos modelos igualmente plausibles producen perfiles que difieren en un diez por ciento en la velocidad de los primeros treinta metros y esa diferencia es suficiente para cambiar la clasificación de sitio de Tipo C a Tipo D, entonces la clasificación no es una propiedad del suelo sino una propiedad del modelo elegido, y la distinción no es semántica porque afecta la selección de espectros de diseño, los factores de amplificación y en última instancia las solicitaciones sobre la estructura. Los métodos de inversión han evolucionado para manejar esa ambigüedad y los algoritmos de búsqueda global como simulated annealing, algoritmos genéticos y neighborhood algorithm exploran el espacio de parámetros y devuelven un conjunto de modelos aceptables en lugar de uno solo, de modo que la práctica de reportar el modelo de mejor ajuste como si fuera el único

posible es una simplificación que la propia técnica desaconseja y que sin embargo se ha vuelto estándar en los informes de microzonificación.

La Figura 1 muestra los valores de Vs30 reportados para cinco sondajes; el rango de 346 a 390 metros por segundo es lo bastante estrecho para que la comparación entre sitios se sostenga, pero lo bastante amplio para que un cambio de umbral normativo altere la clasificación.

Figura 1

Velocidad media de ondas de corte por sondaje



Fuente: elaboración propia con base en los perfiles de ondas superficiales del distrito de Trujillo.

La diferencia entre familia y representante importa cuando los resultados se usan para tomar decisiones porque un mapa que dice Vs30 igual a 350 es una simplificación de un conjunto de modelos que podrían dar 320, 380 o 400, y la simplificación es útil para comunicar pero pierde la información sobre el margen, que en muchos casos es la

información más relevante para el usuario. Un informe que reporta el intervalo junto con el valor central no solo es más honesto sino más útil, porque permite al ingeniero saber cuándo está cerca de un umbral normativo y cuándo no, y esa información es la que marca la diferencia entre una decisión informada y una decisión que se apoya en una certeza que los datos no sostienen.

2.3 Lo que la fuente no alcanza a ver

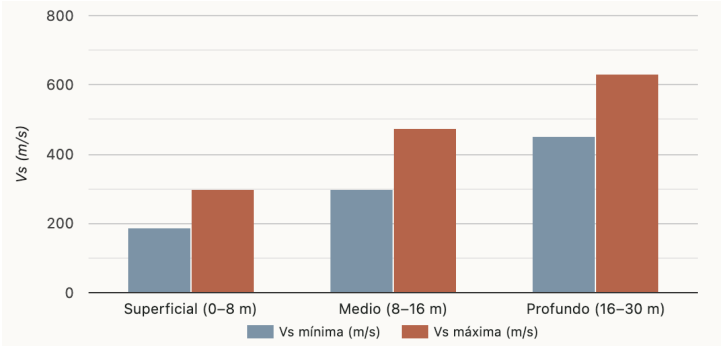
Hay un sesgo que afecta especialmente a los ensayos con fuente activa y que se conoce como sesgo de campo cercano: cuando la fuente está demasiado próxima al primer geófono la onda que llega no es una onda Rayleigh plana bien formada, la hipótesis de propagación horizontal se rompe y la velocidad de fase se subestima sobre todo en las frecuencias bajas, que son precisamente las que controlan la profundidad de investigación. El efecto se documentó en la década de 2000 cuando Bodet y colaboradores mostraron que la distancia entre la fuente y el primer receptor modifica la curva de dispersión en el rango que controla la profundidad de investigación, y Yoon y Rix cuantificaron el sesgo y propusieron criterios de distancia mínima, de modo que la conclusión práctica es que si el arreglo no se diseña con cuidado los estratos más profundos quedan sistemáticamente subestimados.

En Trujillo los perfiles muestran velocidades que aumentan con la profundidad y que van de alrededor de 250 metros por segundo en los primeros ocho metros a 350 en el tramo intermedio y 450 o más en el profundo, y ese patrón es el esperado en un suelo sedimentario, pero la pregunta es cuánto de ese aumento es real y cuánto es el resultado de una curva sesgada en bajas frecuencias. La geometría del arreglo no se reporta y no se indica la distancia entre fuente y primer geófono ni el espaciamiento entre receptores ni la longitud total de la línea más allá del dato general de 53 o 72 metros, de modo que sin esos datos no es posible evaluar si el sesgo fue controlado o si quedó incorporado en el resultado, y esa ausencia de información es en sí misma un dato sobre la calidad del reporte.

La Figura 2 muestra cómo se amplía el rango de velocidades a medida que aumenta la profundidad; la incertidumbre no se distribuye de manera uniforme, sino que se concentra en los estratos que el modelo necesita pero que la señal no alcanza a resolver con la misma nitidez.

Figura 2

Rango de velocidades por profundidad



Fuente: elaboración propia con base en los perfiles de ondas superficiales del distrito de Trujillo.

El sesgo de campo cercano no es el único porque la presencia de ruido ambiental como tráfico, vibración de maquinaria o actividad humana contamina el registro y puede alterar la curva de dispersión, y los ensayos pasivos que usan el ruido como fuente tienen sus propios sesgos porque la distribución de fuentes no es conocida y la hipótesis de campo de ondas difuso no siempre se cumple. Un estudio de 2023 sobre la influencia del ruido en ensayos MASW encontró que en entornos urbanos con niveles de ruido superiores a 70 decibelios la curva de dispersión puede desviarse en el rango de tres a ocho hercios, que es precisamente el que controla la profundidad de quince a treinta metros, y la desviación no es aleatoria sino que tiende a subestimar la velocidad de fase, de modo que los

autores recomendaron filtrar el ruido antes del procesamiento y reportar el nivel de ruido durante la adquisición, algo que en los ensayos de Trujillo no se hizo ni se reportó.

2.4 La calicata como ancla

Frente a la incertidumbre de los métodos indirectos la exploración directa ofrece un ancla porque una calicata de tres metros no da un perfil de velocidades pero da algo que el perfil no puede dar, que es la textura del suelo, su plasticidad, su contenido de humedad y su clasificación, y permite tocar el material y describirlo. En Trujillo se han ejecutado decenas de calicatas complementadas con ensayos de penetración estándar y de penetración dinámica ligera, y los resultados se han usado para calcular capacidades portantes y definir zonas geotécnicas, pero lo que no se ha hecho es cruzar sistemáticamente esos resultados con los perfiles geofísicos en los mismos puntos porque las calicatas y las líneas de MASW están distribuidas en el territorio pero no siempre coinciden espacialmente.

La validación cruzada no es un requisito formal sino una necesidad práctica porque si el perfil de MASW dice que a diez metros hay 350 metros por segundo y la calicata cercana dice que a esa profundidad hay una arcilla de consistencia media la pregunta es si ambos datos son compatibles, y a veces lo son y a veces no, y cuando no lo son

el perfil necesita revisión. Un estudio de 2022 sobre la incertidumbre en ensayos MASW planteó el problema en términos de información y concluyó que la incorporación de datos de perforación reduce la dispersión de los modelos equivalentes y mejora la estimación del perfil, de modo que el ancla no solo verifica sino que acota.

La validación cruzada tiene una limitación que conviene reconocer y es que la calicata ve los primeros tres metros mientras que el perfil de MASW ve treinta, de modo que en el rango de cero a tres metros la comparación es posible pero en el rango de tres a treinta la calicata no dice nada y la validación es parcial porque confirma la parte superficial del perfil pero deja sin verificar la parte profunda, que es precisamente donde la incertidumbre de la inversión es mayor. Los ensayos de penetración estándar ofrecen información hasta profundidades mayores y un SPT puede llegar a quince o veinte metros, y el número de golpes se correlaciona con la densidad relativa del suelo, pero esa correlación no es directa con la velocidad de onda de corte porque las correlaciones empíricas existen pero varían según el tipo de suelo, la edad geológica y la historia de esfuerzos.

Un estudio de 2024 sobre la correlación entre ambos parámetros encontró que en suelos residuales la dispersión de la correlación es tan alta que el intervalo de confianza de la predicción de Vs a partir de N supera el treinta por

ciento, y la conclusión fue que la correlación sirve para verificar órdenes de magnitud pero no para validar valores puntuales. En Trujillo la comparación no se ha hecho y los datos existen porque las calicatas, los SPT, los DPL y los perfiles de MASW están en los registros, pero lo que falta es el cruce, y esa ausencia es una de las razones por las que la incertidumbre de los perfiles no se ha podido acotar.

2.5 La medición como construcción

Lo que se mide en un ensayo de ondas superficiales no es la velocidad de las ondas de corte sino la respuesta del suelo a una perturbación registrada por sensores en superficie, y la velocidad es una inferencia que depende de supuestos como que la onda es Rayleigh, que el medio es horizontalmente estratificado, que la fuente está suficientemente lejos y que los modos superiores se identifican correctamente. Ninguno de esos supuestos es exacto y todos son aproximaciones, de modo que la pregunta no es si se cumplen sino cuánto se desvían y qué efecto tiene esa desviación sobre el resultado, y la respuesta honesta es que no se sabe con precisión porque los estudios de sensibilidad muestran que la incertidumbre en la velocidad de las capas profundas es mayor que en las superficiales y que la incertidumbre en los espesores es mayor que en las velocidades, pero cuantificar esa incertidumbre para un sitio específico requiere un análisis que no se ha hecho.

Eso no invalida los perfiles sino que los hace condicionales, y la distinción importa porque las decisiones que se toman con esos perfiles tratan el valor como si fuera una medición directa cuando no lo es. La construcción de un perfil de velocidades es en este sentido un ejercicio de interpretación porque el dato bruto es una serie de registros de movimiento en superficie, el procesamiento extrae una curva de dispersión y la inversión produce un modelo de capas, y cada paso añade supuestos y cada supuesto añade incertidumbre, de modo que el resultado final es un número que parece una propiedad del suelo pero que es el producto de una cadena de decisiones.

Reconocer esa cadena no es un ejercicio de escepticismo sino la condición para usar la información de manera responsable, porque un perfil de velocidades que se reporta sin su margen es una simplificación que puede inducir a error mientras que un perfil que se reporta con su margen es una herramienta que permite decidir con conciencia de lo que se sabe y lo que no. La práctica internacional avanza en esa dirección y los informes de ensayos geofísicos en países con normativa más desarrollada incluyen junto con el perfil una estimación de la incertidumbre y una descripción de los supuestos de adquisición, mientras que en el Perú esa práctica no se ha generalizado y los informes reportan el perfil y a veces el error de ajuste, pero el error de ajuste no es la incertidumbre del perfil porque es la bondad del ajuste de un modelo a una curva y un modelo puede ajustar bien y estar lejos del perfil real.

La diferencia entre ajuste e incertidumbre es la diferencia entre la coherencia interna de un modelo y su correspondencia con el suelo, y un modelo puede ser internamente coherente porque reproduce la curva medida y sin embargo no corresponder al suelo real porque la curva medida no es una propiedad del suelo sino del sistema de medición, de modo que la incertidumbre incluye ambas fuentes y cuantificarla requiere propagar los errores de medición a través del proceso de inversión y comparar los modelos resultantes con información independiente para evaluar si el conjunto de modelos compatibles con la curva es también compatible con la evidencia directa.

2.6 La incertidumbre se puede medir: el giro bayesiano

Hay una manera de tratar la no unicidad que no consiste en elegir un modelo y descartar los demás sino en quedarse con todos y reportar cómo se distribuyen, y la inversión bayesiana formaliza esa idea porque en lugar de buscar el modelo que mejor ajusta la curva calcula la probabilidad de cada modelo dado el dato medido, de modo que el resultado no es un perfil sino una distribución de perfiles en la que el valor central es la mediana y el margen es el intervalo de credibilidad. Un estudio aplicado al delta del río Fraser en Canadá utilizó este enfoque para invertir curvas de dispersión de microtremores y reportó perfiles de Vs con intervalos de credibilidad del noventa

y cinco por ciento hasta 110 metros de profundidad, y el perfil dejó de ser una línea y se convirtió en una banda, y la diferencia entre una línea y una banda tiene consecuencias para la clasificación de sitio porque si la banda cruza el umbral de 360 metros por segundo que separa el Tipo C del Tipo D la clasificación es ambigua no porque el dato sea malo sino porque el dato no alcanza para decidir, y reportar la ambigüedad es más honesto que resolverla arbitrariamente.

Un trabajo de 2026 llevó esa lógica un paso más allá y en la isla de Penang un equipo entrenó una red neuronal bayesiana para estimar Vs30 a partir de mediciones de microtremores de una sola estación, y el modelo no solo predice el valor sino que entrega intervalos de confianza calibrados, y los autores evaluaron la calibración con dos métricas que son la cobertura del intervalo de predicción y el ancho medio del intervalo, y argumentaron que esa información permite a los profesionales interpretar la clasificación de sitio de manera informada por el riesgo evitando decisiones de zonificación excesivamente confiadas en áreas con restricciones limitadas. La frase condensa el problema porque un mapa sin margen invita a confiar más de lo que los datos permiten, y en el Perú la práctica dominante sigue siendo el valor puntual y los estudios de microzonificación de los distritos de Lima publicados en la última década reportan Vs30 sin intervalo ni análisis de sensibilidad.

2.7 La brecha entre métodos no es un error: es información

La comparación entre MASW y ensayos de penetración estándar produce discrepancias que a veces se leen como fallas de uno u otro método, pero la lectura más productiva es otra y es que la brecha indica dónde el suelo es complejo. Un estudio de 2026 en Indonesia comparó perfiles de MASW y SPT en un sitio con estratificación irregular y el perfil de MASW arrojó un Vs30 de 541,7 metros por segundo que clasificó el sitio como Tipo C, y la correlación con datos de perforación confirmó la presencia de arcillas y limos en las capas superiores seguidos de arcillolitas y areniscas a mayor profundidad, y a pesar de esa coherencia general los autores reportaron discrepancias puntuales con los perfiles derivados de SPT y las atribuyeron a tres factores que son los contrastes de velocidad abruptos, la estratificación irregular y los modos superiores de Rayleigh.

Los tres factores son conocidos y el primero es una limitación física porque cuando hay un contraste fuerte entre dos capas la inversión tiene dificultades para resolver la interface, el segundo es una consecuencia de la geometría porque la línea de MASW promedia lateralmente y ese promedio oculta variaciones que el sondaje que es vertical y discreto detecta, y el tercero es un problema de procesamiento porque si los modos superiores no se identifican la

curva de dispersión se contamina y el perfil se desvía. La conclusión del estudio no fue que un método sea superior sino que refinar las técnicas de inversión e integrar múltiples métodos geofísicos es crucial para mejorar la caracterización del subsuelo, y la integración no es un adorno metodológico sino el mecanismo que permite acotar la incertidumbre de cada método con la información del otro, y en Trujillo la integración no se ha hecho porque los datos existen y las calicatas, los SPT, los DPL y los perfiles de MASW están en los registros, pero lo que falta es el cruce.

2.8 Lo que la norma asume y lo que el suelo ofrece

La clasificación de sitio según Vs30 es una convención y la norma peruana E.030 como la mayoría de las normas internacionales divide el suelo en categorías a partir de umbrales que son Tipo A para roca, Tipo B para suelo muy denso, Tipo C para suelo denso o roca blanda, Tipo D para suelo rígido y Tipo E para suelo blando, y los umbrales son números mientras que el suelo es un continuo. La convención funciona cuando el valor de Vs30 está lejos de un umbral porque si un sitio tiene 500 metros por segundo la clasificación Tipo C es robusta aunque el margen sea de 50, pero si un sitio tiene 360 el margen importa porque un error de diez metros por segundo cambia la categoría.

Un estudio reciente en Lima evaluó el desempeño de los factores de amplificación de la norma E.030 frente a registros del sismo de Mala de 2021 y los resultados mostraron que la norma funcionó bien en suelos rígidos con un error cuadrático medio de 33,1 centímetros por segundo al cuadrado en ocho de diez estaciones, pero en suelos más blandos el error superó los 37 centímetros por segundo al cuadrado, y la conclusión de los autores fue que los factores normativos necesitan revisión para suelos blandos. La observación conecta con la discusión de este capítulo porque si la norma clasifica el suelo con un valor puntual y ese valor tiene un margen, la amplificación que la norma prescribe hereda ese margen y la norma no lo reconoce porque trata el Vs30 como una propiedad medida y no como una estimación, y esa ficción tiene consecuencias prácticas porque un sitio clasificado como Tipo C con un Vs30 de 365 metros por segundo puede comportarse en la realidad como un Tipo D si el valor verdadero es 355, y la diferencia no es académica porque cambia el espectro de diseño, cambia la fuerza sísmica y cambia la estructura.

La práctica internacional avanza hacia normas que incorporan la incertidumbre y la red neuronal bayesiana de Penang con sus intervalos calibrados es un ejemplo de cómo podría hacerse, pero el camino no es sencillo porque requiere datos de entrenamiento, validación independiente y una cultura de reporte que hoy no existe en la mayoría de los estudios peruanos, aunque el problema está identificado y la dirección es clara.

2.9 Lo que se puede afirmar y lo que no

Al final de este recorrido conviene ser explícito sobre lo que los perfiles de ondas superficiales permiten afirmar y lo que no, y lo primero que permiten afirmar es que el suelo de una zona es en promedio más rígido o más blando que el de otra, y esa comparación relativa es robusta porque no depende de un valor puntual sino que si un sitio tiene un Vs30 estimado de 390 y otro de 346 la diferencia de 44 metros por segundo es mayor que los márgenes típicos de la inversión y la conclusión de que el primero es más rígido que el segundo se sostiene. También permiten afirmar que el perfil muestra un aumento de velocidad con la profundidad, y ese patrón es consistente en todos los sondajes y coincide con lo que la geología del valle sugiere porque los sedimentos son más sueltos arriba y más compactos abajo, de modo que la tendencia es más robusta que los valores individuales.

Lo que no permiten afirmar es que el Vs30 de un sitio sea exactamente 358 metros por segundo porque el valor es una estimación dentro de un intervalo que no se ha cuantificado, y la diferencia entre 358 y 370 puede parecer pequeña pero si cruza un umbral normativo deja de serlo. Tampoco permiten afirmar que el perfil profundo sea confiable porque el sesgo de campo cercano y la atenuación de la señal en bajas frecuencias afectan precisamente la

zona que está más allá de los quince metros, y el perfil profundo es el más incierto. Y no permiten afirmar que el suelo es horizontalmente homogéneo en toda la extensión de la línea porque el método promedia lateralmente y lo que hay entre geófonos no se ve, de modo que la distinción entre lo que se afirma y lo que no es el aporte de este capítulo porque no invalida los perfiles sino que los sitúa.

2.10 La física de la dispersión, paso a paso

Para entender por qué la curva de dispersión no es una propiedad del suelo sino una respuesta del sistema conviene reconstruir el recorrido de la onda desde que la fuente golpea el terreno hasta que el último geófono registra la señal, y cuando el impacto se produce la energía se transmite en todas las direcciones pero solo una fracción viaja a lo largo de la superficie como onda Rayleigh y esa fracción es la que los receptores captan mientras el resto se disipa en el interior del terreno o se refleja en las interfaces. La onda que viaja por la superficie no es una línea abstracta sino un frente que se expande y que al atravesar capas de distinta rigidez se descompone en componentes que viajan a velocidades diferentes según la frecuencia que transportan, y las componentes de alta frecuencia quedan confinadas en los primeros metros mientras que las de baja frecuencia penetran hasta profundidades que pueden superar los treinta metros, y esa separación

es la que permite en teoría reconstruir la estratificación a partir de la superficie, pero el problema es que la onda no viaja por una capa a la vez sino que viaja por todas al mismo tiempo y la velocidad que se mide en superficie es un promedio ponderado que depende de la distribución de rigidez en profundidad, de la longitud de onda y de la proporción de energía que cada capa transporta.

El promedio no es una simple media aritmética porque las capas más superficiales pesan más en las frecuencias altas y menos en las bajas, de modo que la curva de dispersión contiene información sobre la estratificación pero esa información está mezclada y requiere un proceso de separación que no es único. Un estudio de 2021 comparó tres algoritmos de extracción de curvas de dispersión aplicados al mismo conjunto de registros y encontró diferencias de hasta un quince por ciento en la velocidad de fase en el rango de cinco a diez hercios, y las diferencias no se debían a errores de implementación sino a que cada algoritmo resuelve de manera distinta el problema de separar el modo fundamental de los modos superiores, y esa separación es la que determina qué parte de la señal se atribuye a qué profundidad. La consecuencia práctica es que la curva de dispersión que se usa como dato de entrada para la inversión no es un dato bruto sino un dato procesado, y el procesamiento involucra decisiones que no siempre se reportan y que sin embargo condicionan el resultado final.

La interferencia de modos superiores añade una dificultad que no se resuelve con más datos sino con más criterio porque en un medio estratificado la onda Rayleigh tiene múltiples modos de propagación y el modo fundamental es solo el primero de ellos, y los modos superiores viajan más rápido y en ciertas combinaciones de frecuencia y contraste de rigidez pueden transportar más energía que el fundamental, y cuando eso ocurre la curva que se extrae del registro no es la del modo fundamental sino una mezcla y la inversión que la interpreta como si fuera un modo único produce un perfil sesgado. Un estudio con arreglos lineales en la costa peruana documentó ese fenómeno en suelos con contraste de rigidez abrupto y advirtió que ignorar la interferencia lleva a sobreestimar la velocidad de las capas profundas, que es precisamente la zona donde la incertidumbre es mayor, y la advertencia tiene una implicación que va más allá del caso peruano porque en cualquier terreno donde exista un contraste fuerte entre una capa blanda y una rígida la curva de dispersión puede contener información de modos superiores que el procesamiento convencional no separa y el perfil resultante puede ser internamente coherente sin ser correcto.

La profundidad de investigación es otra variable que se suele presentar como un dato cuando en realidad es un límite, porque con fuentes activas y arreglos de decenas de metros la señal confiable llega a los treinta metros pero más allá de esa profundidad la atenuación y la baja rela-

ción señal-ruido hacen que la curva de dispersión se vuelva inestable y que la inversión tenga que extrapolar. En Trujillo los perfiles reportados cubren los primeros treinta metros y lo que hay debajo es una extrapolación que se apoya en el supuesto de que la velocidad sigue aumentando con la profundidad, un supuesto razonable en un valle sedimentario pero que no está verificado por medición directa, y la distinción entre lo medido y lo extrapolado importa porque las decisiones de diseño se toman sobre el perfil completo y no solo sobre los primeros metros, y la parte extrapolada es la que tiene mayor incertidumbre y menor respaldo empírico.

2.11 La no unicidad, con un ejemplo concreto

Para entender qué significa que la inversión tenga múltiples soluciones conviene imaginar un caso sencillo con dos capas sobre un semiespacio rígido, en el que la curva de dispersión medida muestra cómo varía la velocidad de fase con la frecuencia y el inversor busca un conjunto de espesores y velocidades que reproduzca esa curva, y el problema es que distintas combinaciones de espesor y velocidad producen curvas casi idénticas dentro del error de medición, de modo que una capa blanda de diez metros sobre una capa rígida de veinte puede producir una curva muy similar a la de una capa blanda de doce metros sobre una capa rígida de dieciocho y la diferencia

entre ambos modelos está dentro de la incertidumbre del dato. Si el inversor elige el primer modelo el perfil resultante tendrá una interface a diez metros y si elige el segundo la interface estará a doce, y esa diferencia de dos metros puede cambiar la profundidad a la que se calcula la amplificación y por lo tanto el período dominante del sitio.

Un estudio de 2009 llevó ese ejercicio un paso más allá y propagó los modelos equivalentes a un análisis de respuesta sísmica, y el resultado fue que las diferencias en la amplificación calculada podían ser considerables no porque los modelos fueran malos sino porque la amplificación es sensible a la distribución de rigidez en profundidad y esa distribución no está completamente determinada por la curva de dispersión. La conclusión del estudio no fue que la inversión sea inútil sino que el perfil de mejor ajuste no es el único perfil posible y que reportarlo como si lo fuera es una simplificación que puede inducir a error, y la práctica de reportar un solo modelo que es la dominante en los estudios de microzonificación pierde la información sobre el margen, y esa información es la que permite saber cuándo el resultado es robusto y cuándo es frágil.

La comparación entre métodos directos e indirectos añade otra dimensión al problema porque un trabajo de 2026 comparó perfiles de MASW y ensayos de penetración estándar en un sitio con estratificación irregular y

encontró que las correlaciones empíricas entre el número de golpes y la velocidad de onda de corte fallan cuando el suelo presenta contrastes abruptos o modos superiores de Rayleigh, y la conclusión fue que la clasificación de sitio basada solo en MASW sin verificación con métodos directos puede desviarse de la clasificación normativa, y esa desviación no es un error de uno u otro método sino una consecuencia de que ambos miden cosas distintas y de que la relación entre ellas no es unívoca. La integración de métodos no elimina la incertidumbre pero la acota porque cada método aporta información que el otro no tiene y la combinación reduce el espacio de modelos compatibles con toda la evidencia disponible.

La incertidumbre entonces no es un defecto que se pueda corregir con más tecnología sino una condición que se puede gestionar con más información y más transparencia, y un perfil que se reporta con su margen y con la descripción de los supuestos de adquisición es más útil que un perfil que se reporta como un valor puntual no porque sea más preciso sino porque permite al usuario saber cuánto puede confiar en él y en qué condiciones. La diferencia entre un mapa que dice Vs30 igual a 350 y otro que dice Vs30 igual a 350 con intervalo de 320 a 380 y supuestos de adquisición reportados es la diferencia entre una respuesta y una respuesta con su contexto, y el contexto es lo que permite decidir con conciencia de lo que se sabe y lo que no.

Capítulo 3

Los supuestos de la simulación y su efecto en los resultados

La Zona IV de Trujillo, según los cálculos, alcanza un pico espectral de 2,6 g. Es el valor más alto de las cuatro zonas. Ese número sale de un modelo que supone capas horizontales, extensión infinita y comportamiento lineal equivalente. En Santa María V Etapa, el nivel freático aparece a 1,20 metros. En Las Casuarinas, a 3,30. La geometría real del subsuelo no es horizontal.

La distancia entre el modelo y el suelo recorre este capítulo. Simular la respuesta sísmica de un terreno no es reproducir lo que ocurrirá. Es proyectar un conjunto de supuestos sobre una realidad que rara vez los cumple, y todo supuesto que se relaja introduce una desviación que el resultado final no declara.

3.1 La columna que se supone infinita

El análisis unidimensional de respuesta sísmica es la herramienta más extendida para estimar cómo se amplifica el movimiento del suelo durante un sismo. Su lógica es sencilla: se supone que el terreno está formado por una serie de capas horizontales, cada una con su espesor, su densidad y su velocidad de onda de corte, y que una onda sísmica que viaja verticalmente desde el basamento las atraviesa una tras otra. Cada capa filtra la onda de una manera distinta según su rigidez y su espesor, y el resultado en superficie es una señal que puede ser mayor

o menor que la señal de entrada, dependiendo de las frecuencias que el terreno amplifique y de las que atenúe.

La simplicidad del método es su virtud y su límite. Funciona bien cuando el terreno se parece a lo que el modelo supone: capas planas, extensión lateral suficiente para que los bordes no importen, y una onda que llega desde abajo en dirección vertical. En esas condiciones, la simulación reproduce con razonable fidelidad lo que se observa en registros de sismos reales. Pero cuando el terreno se aparta de ese ideal, el modelo empieza a fallar de maneras que no siempre son evidentes.

La heterogeneidad lateral es el primer supuesto que se rompe. Un valle sedimentario no es una pila infinita de capas horizontales: tiene bordes, tiene pendientes, tiene variaciones de espesor que cambian en distancias de pocos metros. Cuando una onda sísmica entra en una cuenca sedimentaria, los bordes generan ondas superficiales que se propagan lateralmente y que pueden amplificar el movimiento en ciertas zonas de manera que un modelo unidimensional no captura. Un estudio de 2011 sobre la identificación de modos en ondas Rayleigh mostró que la elipticidad de la onda puede usarse para detectar cuándo el medio deja de ser horizontalmente estratificado, y que en esos casos la inversión unidimensional produce perfiles que promedian lateralmente y ocultan las variaciones que más importan. Un trabajo de 2014 sobre modelación nu-

mérica de efectos de sitio en microzonificación llegó a una conclusión similar: en cuencas con geometría compleja, los modelos bidimensionales y tridimensionales arrojan factores de amplificación que el modelo unidimensional no reproduce, y las diferencias pueden ser significativas en los bordes de la cuenca y en las zonas donde el basamento rocoso se eleva.

En Trujillo, el valle del río Moche tiene bordes que no son infinitos y una geometría que cambia de un punto a otro. Las urbanizaciones de la Zona IV están cerca de las estribaciones andinas, donde el basamento rocoso se eleva y la cobertura sedimentaria se adelgaza. En esa transición, el supuesto de capas horizontales es una aproximación que puede estar lejos de la realidad. Los espectros calculados con el modelo unidimensional no incorporan esa transición, y por lo tanto no pueden capturar los efectos que la geometría del basamento produce sobre la amplificación.

El segundo supuesto que se rompe es el de la propagación vertical. La onda sísmica no llega siempre desde abajo en dirección perpendicular a la superficie. Dependiendo de la distancia al epicentro y de la profundidad del sismo, la onda puede llegar con un ángulo de incidencia que no es vertical, y ese ángulo afecta la manera en que la energía se distribuye entre las componentes horizontal y vertical del movimiento. El modelo unidimensional supone incidencia vertical porque simplifica el problema, pero la simpli-

ficación tiene un costo: la respuesta calculada puede sobreestimar o subestimar la amplificación dependiendo de la geometría real de la fuente.

Un estudio de 2020 sobre el efecto de la incidencia oblicua en la respuesta de sitio encontró que, para ángulos de incidencia de hasta treinta grados, las diferencias en la amplificación calculada con respecto al caso vertical pueden alcanzar el veinte por ciento en el rango de períodos de interés para edificaciones de mediana altura. La observación no invalida el modelo unidimensional, pero sí delimita su alcance: es una aproximación válida para ondas que llegan casi verticalmente, y en Trujillo, donde los sismos de subducción pueden llegar con ángulos variables, esa condición no siempre se cumple.

El tercer supuesto que se rompe es el de la extensión lateral infinita. El modelo unidimensional supone que cada capa se extiende hasta el infinito en dirección horizontal, de modo que no hay bordes que reflejen energía ni cambios laterales que desvíen la onda. En un terreno real, los bordes existen y generan reflexiones y refracciones que el modelo no captura. En una ciudad como Trujillo, donde el suelo cambia de composición en distancias de pocos cientos de metros, el supuesto de extensión infinita es una simplificación que puede afectar la respuesta calculada en las zonas de transición.

3.2 La linealidad que se agota

El método lineal equivalente es la técnica más usada para incorporar el comportamiento no lineal del suelo en un análisis unidimensional. La idea es iterativa: se supone que el suelo se comporta linealmente con cierta rigidez y cierto amortiguamiento, se calcula la respuesta, se estima la deformación que esa respuesta produce, y con esa deformación se ajustan la rigidez y el amortiguamiento para la siguiente iteración. El proceso se repite hasta que la deformación calculada y la rigidez supuesta son compatibles, y el resultado es un modelo que captura, de manera aproximada, la pérdida de rigidez que el suelo experimenta cuando se deforma.

La aproximación funciona bien cuando las deformaciones son pequeñas, porque en ese rango el suelo se comporta de manera casi lineal y la iteración converge a una solución que reproduce lo que se observa en la realidad. Pero cuando las deformaciones superan cierto umbral, el método pierde precisión y los resultados empiezan a desviarse de lo que un análisis no lineal en el dominio del tiempo produciría. Un estudio de 2015 sobre el concepto de superposición en la modelación de respuesta de sitio mostró que el método lineal equivalente puede sobreestimar la amplificación en el rango de deformaciones medias y subestimarla en el rango de deformaciones altas, y

que el error depende del tipo de suelo y de la intensidad del movimiento. Un trabajo de 2016 comparó los resultados de análisis lineales equivalentes y no lineales para un conjunto de registros y encontró que las diferencias en la aceleración espectral pueden superar el treinta por ciento en el rango de períodos cortos cuando las deformaciones cortantes superan el uno por ciento.

En Trujillo, la simulación unidimensional con Edushake se aplicó con una señal escalada a 0,45 g, y los resultados incluyen picos espectrales de hasta 2,6 g en la Zona IV. Esos valores implican deformaciones cortantes que, en suelos blandos como las arcillas de la Zona IV, pueden superar el rango de validez del método lineal equivalente. El estudio no reporta las deformaciones calculadas ni verifica que permanezcan dentro del rango en el que el método es confiable, y esa ausencia de verificación es una limitación que afecta la interpretación de los resultados.

La linealidad equivalente no es el único supuesto que se relaja en la simulación. El método también supone que el suelo es homogéneo dentro de cada capa, que las propiedades no cambian con la deformación de manera abrupta y que el amortiguamiento es viscoso y proporcional a la velocidad de deformación. En suelos reales, ninguna de esas condiciones se cumple exactamente, y las desviaciones se acumulan en el resultado final. Un estudio de 2021 sobre la calibración de modelos lineales equivalentes para

suelos limosos encontró que el amortiguamiento efectivo que mejor reproduce la respuesta observada es mayor que el que las curvas de degradación estándar sugieren, y que usar las curvas estándar lleva a sobreestimar la amplificación en el rango de períodos cercanos al período fundamental del sitio.

La consecuencia práctica es que los espectros calculados con el método lineal equivalente son una aproximación que funciona bien en ciertos rangos y mal en otros, y que sin un análisis de sensibilidad que muestre cuánto cambian los resultados al variar los parámetros del modelo, no es posible saber en qué rango se está. En Trujillo, ese análisis no se ha hecho.

3.3 La cadena de la atenuación

La simulación de la respuesta de sitio no empieza en el suelo: empieza en la fuente. Para calcular cómo se mueve la superficie durante un sismo, primero hay que estimar cómo se mueve el basamento rocoso, y esa estimación se hace con leyes de atenuación que relacionan la magnitud del sismo y la distancia al sitio con la aceleración que se espera en roca. Esas leyes se construyen a partir de registros de sismos reales, y su precisión depende de la cantidad y la calidad de los datos disponibles.

En el Perú, las leyes de atenuación más usadas son las de Young et al. y las del CISMID, y ambas se basan en registros de sismos de subducción en la costa peruana y en otras regiones. Un estudio de 2006 desarrolló la ley CISMID a partir de registros de la red acelerográfica del CISMID y de datos de sismos de interfase e intraplaca, y la ley de Young et al. se basa en registros de Alaska, Chile, Cascadia, Japón, México y Perú. Las dos leyes producen resultados distintos para el mismo escenario, y esa diferencia no es un detalle: para un periodo de retorno de 475 años en suelo firme, la ley de Young et al. da 0,52 g y la ley CISMID da 0,43 g. La diferencia de 0,09 g se propaga a la aceleración de entrada de la simulación, a los espectros de respuesta y a las aceleraciones por zona.

La elección de una ley sobre otra no es trivial, y el estudio de Trujillo no la justifica. Usa ambas en distintos análisis y reporta los resultados, pero no explica por qué en unos casos usa una y en otros la otra, ni presenta un análisis de sensibilidad que muestre cómo cambian los resultados finales al adoptar el modelo alternativo. En rigor, los espectros reportados son condicionales a una elección de atenuación que no se discute.

La ley de atenuación no es el único eslabón de la cadena. Entre la fuente y el basamento hay una distancia y una profundidad que también tienen incertidumbre, y la magnitud del sismo de diseño es una estimación que depende

de la interpretación del catálogo sísmico y de la recurrencia de eventos grandes. Un estudio de 2020 sobre la incertidumbre en la estimación de la peligrosidad sísmica en la costa peruana encontró que la magnitud de diseño para un periodo de retorno dado puede variar en 0,2 unidades dependiendo de la fuente sismogénica que se use y del modelo de recurrencia que se adopte, y esa variación se traduce en diferencias de hasta el quince por ciento en la aceleración esperada.

La cadena completa —fuente, atenuación, basamento, suelo— acumula incertidumbres en cada eslabón, y el resultado final es una estimación que hereda todas ellas. El estudio de Trujillo reporta el resultado pero no descompone la cadena ni muestra cuánto aporta cada eslabón a la incertidumbre total. La consecuencia es que el usuario del espectro no sabe si el valor que recibe es robusto o si depende de una elección arbitraria en algún punto del proceso.

3.4 El espectro como promesa condicional

Un espectro de respuesta es una representación de la aceleración máxima que experimentaría una estructura de un grado de libertad con cierto período y cierto amortiguamiento cuando se le aplica un movimiento del suelo. Es una herramienta de diseño porque permite leer, para

cada período, la demanda sísmica que la estructura debe resistir, y es también una simplificación porque reduce un movimiento complejo, que varía en el tiempo y en la frecuencia, a una curva que solo depende del período.

Esa simplificación es útil pero tiene límites. El espectro supone que la estructura se comporta linealmente, que su respuesta está dominada por el primer modo de vibración y que el suelo y la estructura no interactúan. En la realidad, las estructuras se deforman más allá del rango lineal, sus modos superiores contribuyen a la respuesta y la interacción suelo-estructura modifica el movimiento que la cimentación transmite al edificio. Los espectros de diseño incorporan factores que intentan corregir esas desviaciones, pero los factores son empíricos y su validez depende del tipo de estructura y del tipo de suelo.

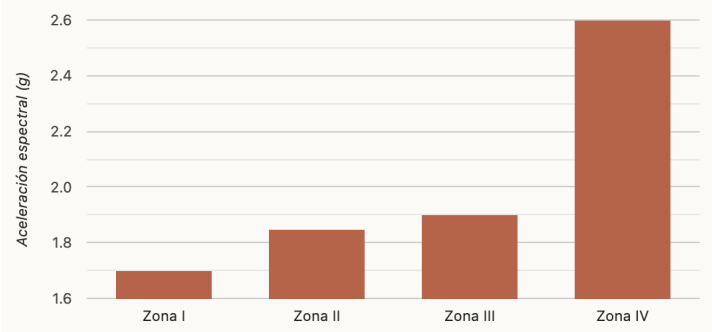
En Trujillo, los espectros calculados con el modelo unidimensional muestran picos que van de 1,7 g en la Zona I a 2,6 g en la Zona IV. Esos valores son el resultado de amplificar la señal de entrada con la función de transferencia del suelo, y la función de transferencia depende de los parámetros del modelo: espesores, velocidades, densidades y amortiguamientos. Como se discutió en el capítulo anterior, esos parámetros tienen incertidumbre, y la incertidumbre se propaga al espectro.

Un estudio de 2025 sobre la evaluación comparativa de métodos de respuesta de sitio en Lima encontró que los espectros calculados con modelos unidimensionales pueden diferir de los registros observados en un factor de dos o más en el rango de períodos cercanos al período fundamental del sitio, y que las diferencias dependen del método de análisis y de la calidad de los parámetros de entrada. El estudio concluyó que los espectros de diseño deben usarse con cautela y que la caracterización específica de sitio es necesaria cuando la estructura es sensible a las frecuencias que el modelo no captura bien.

La observación se aplica a Trujillo. Los espectros de las cuatro zonas son una herramienta de planificación, no una predicción. Dicen que la Zona IV amplifica más que la Zona I, y esa comparación relativa es robusta. Pero no dicen que en la Zona IV la aceleración será exactamente 2,6 g, porque ese valor depende de supuestos que no se han verificado.

Figura 3

Picos espectrales por zona



Fuente: elaboración propia con base en los espectros de respuesta por zona.

3.5 Lo que el modelo no puede ver

La simulación unidimensional con Edushake tiene una limitación que va más allá de los supuestos: no puede ver lo que ocurre entre las capas. El modelo supone que cada capa es homogénea y que la transición entre una y otra es abrupta, pero en la realidad las transiciones son graduales y las propiedades cambian de manera continua. Esa diferencia afecta la manera en que la onda se propaga y la amplificación que produce.

Un estudio de 2019 sobre el efecto de las transiciones graduales en la respuesta de sitio encontró que, cuando la transición entre dos capas es gradual en lugar de abrupta, la amplificación en el rango de frecuencias cercanas a la

frecuencia de resonancia de la capa blanda se reduce, y que el modelo que supone transiciones abruptas sobreestima la amplificación. La observación es relevante para Trujillo porque los depósitos del valle del Moche no tienen interfaces nítidas: las capas se mezclan, las gravas aparecen dispersas en la matriz arcillosa y las arenas eólicas se intercalan con los depósitos aluviales.

El modelo tampoco puede ver las heterogeneidades que existen dentro de una misma capa. Una capa de arena puede tener lentes de arcilla, y una capa de arcilla puede tener bolsones de grava, y esas heterogeneidades afectan la propagación de la onda de maneras que el modelo unidimensional no captura. Un estudio de 2022 sobre el efecto de las heterogeneidades internas en la respuesta de sitio encontró que, en suelos con inclusiones de rigidez distinta, la amplificación calculada con un modelo homogéneo puede diferir de la calculada con un modelo que incorpora las inclusiones en un veinte por ciento en el rango de períodos de interés.

La simulación tampoco puede ver el efecto de la topografía. Las colinas y los cerros que rodean Trujillo modifican la manera en que las ondas sísmicas llegan a la ciudad, y ese efecto no se incorpora en un modelo unidimensional. Un estudio de 2020 sobre el efecto de la topografía en la respuesta sísmica de ciudades andinas encontró que, en las laderas y en las zonas cercanas a los cerros, la ampli-

ficación puede ser mayor que en el fondo del valle, y que el efecto depende de la altura y de la geometría de la elevación.

En Trujillo, las urbanizaciones de la Zona IV están cerca de las estribaciones andinas, y las de la Zona I están en el fondo del valle. El modelo unidimensional no distingue entre unas y otras, y por lo tanto no puede capturar el efecto que la topografía produce sobre la amplificación.

3.6 Lo que se puede y no se puede afirmar con un espectro

Al final de este recorrido conviene ser explícito sobre lo que los espectros calculados permiten afirmar y lo que no. Permiten afirmar que la Zona IV amplifica más que la Zona I, y esa comparación relativa es robusta porque no depende de un valor puntual sino de una diferencia que es mayor que la incertidumbre del modelo. Permiten afirmar que el período dominante de la Zona IV está en el rango de 0,40 a 0,50 segundos, y esa estimación es consistente con la estratigrafía de arcillas blandas que se encontró en la exploración. Permiten afirmar que las estructuras altas y flexibles son más vulnerables en la Zona IV que en la Zona I, porque la amplificación en el rango de períodos largos es mayor en la primera.

No permiten afirmar que la aceleración máxima en la Zona IV sea exactamente 2,6 g, porque ese valor depende de supuestos que no se han verificado y de parámetros que tienen incertidumbre. No permiten afirmar que el espectro calculado sea válido para cualquier estructura, porque el espectro supone un grado de libertad y las estructuras reales tienen múltiples modos y comportamientos no lineales. No permiten afirmar que el modelo capture el efecto de la topografía o de las heterogeneidades laterales, porque el modelo unidimensional no las incorpora.

La distinción entre lo que se afirma y lo que no es el aporte de este capítulo. No invalida los espectros. Los sitúa en el contexto de sus supuestos y delimita su alcance.

3.7 La topografía que el modelo no ve

Las colinas que rodean Trujillo no son un decorado. Modifican la manera en que las ondas sísmicas llegan a la ciudad, y esa modificación no está incorporada en los espectros calculados. Cuando una onda atraviesa una elevación topográfica, la geometría del terreno concentra o dispersa la energía, y el resultado es que la amplificación en la cima de una colina o en la ladera de un cerro puede ser mayor que en el fondo del valle, incluso cuando el suelo es el mismo. El fenómeno se conoce desde los años setenta, cuando los registros del sismo de San Fernando,

en California, mostraron que las estaciones ubicadas en zonas elevadas registraban movimientos más intensos que las estaciones del valle.

En los Andes, el efecto es particularmente relevante porque las ciudades suelen estar construidas en valles estrechos rodeados de montañas. Un estudio de 2020 sobre la respuesta sísmica de ciudades andinas encontró que, en laderas con pendientes superiores a quince grados, la amplificación en el rango de períodos cortos puede duplicar la que se calcula con un modelo unidimensional que ignora la topografía. Los autores advirtieron que el efecto es mayor cuando la longitud de onda de la onda sísmica es comparable a la altura de la elevación, y que en esos casos el modelo plano subestima sistemáticamente la demanda sísmica en las zonas altas.

En Trujillo, las urbanizaciones de la Zona IV se extienden hacia el este, donde el valle empieza a cerrarse y las estribaciones andinas se elevan. Los cerros Campana, Prieto, Cabras y San Idelfonso bordean la ciudad por el este y el norte, y las laderas de esos cerros están ocupadas por asentamientos humanos y urbanizaciones que no siempre aparecen en los mapas de microzonificación. El modelo unidimensional que se usó para calcular los espectros supone que el suelo es horizontal y que la topografía no importa, y esa suposición es válida en el fondo del valle pero no en las laderas.

La topografía no solo amplifica el movimiento en las zonas elevadas. También genera efectos de borde en las transiciones entre el valle y las laderas, donde la geometría del basamento rocoso cambia abruptamente y las ondas superficiales se generan por la interacción entre la cuenca sedimentaria y la roca que la rodea. Un estudio de 2021 sobre los efectos de borde en cuencas sedimentarias encontró que, en las zonas cercanas al contacto entre el sedimento y la roca, la amplificación puede ser mayor que en el centro de la cuenca, y que el efecto depende de la geometría del contacto y del contraste de rigidez entre los dos materiales.

En Trujillo, el contacto entre los sedimentos del valle y las rocas de los cerros es una zona de transición que no está caracterizada con el detalle necesario. Las urbanizaciones que están cerca de ese contacto, como las de la Zona IV, podrían estar sujetas a efectos de borde que el modelo unidimensional no captura, y los espectros calculados para esas zonas podrían subestimar la amplificación real.

3.8 La velocidad de la onda que el modelo supone

El modelo unidimensional necesita, como dato de entrada, la velocidad de las ondas de corte en cada capa del suelo. Esa velocidad se obtiene de los perfiles de MASW que se discutieron en el capítulo anterior, y como se vio,

esos perfiles tienen incertidumbre. Pero hay un problema adicional que no se ha mencionado: el modelo supone que la velocidad es constante dentro de cada capa, cuando en la realidad la velocidad varía con la profundidad de manera continua.

La variación continua de la velocidad afecta la manera en que la onda se propaga y la amplificación que produce. Un estudio de 2018 sobre el efecto de los perfiles de velocidad continua en la respuesta de sitio encontró que, cuando la velocidad aumenta gradualmente con la profundidad, la amplificación en el rango de frecuencias cercanas a la resonancia de la capa blanda es menor que la que se calcula con un modelo de capas homogéneas, y que la diferencia puede alcanzar el quince por ciento. La observación es relevante para Trujillo porque los perfiles de MASW muestran precisamente ese aumento gradual: la velocidad pasa de 250 metros por segundo en los primeros metros a 450 en los treinta, sin que haya interfaces nítidas que separen una capa de otra.

El modelo unidimensional, al suponer capas homogéneas, introduce una simplificación que puede sobreestimar la amplificación en algunos rangos de frecuencia y subestimarla en otros. La simplificación es necesaria para poder resolver el problema con las herramientas disponibles, pero su efecto sobre el resultado no se ha evaluado. Un análisis de sensibilidad que comparara los resultados del

modelo de capas homogéneas con los de un modelo de velocidad continua mostraría cuánto de la amplificación calculada es real y cuánto es un artefacto de la simplificación.

La velocidad de la onda también depende de la deformación. En el rango lineal, la velocidad es una propiedad del suelo que no cambia con la amplitud del movimiento. Pero cuando la deformación supera cierto umbral, la velocidad efectiva disminuye porque el suelo pierde rigidez, y esa disminución es la que el método lineal equivalente intenta capturar con la iteración. La precisión de esa captura depende de las curvas de degradación que se usen, y esas curvas son empíricas y varían según el tipo de suelo, la plasticidad y la historia de esfuerzos.

En Trujillo, las curvas de degradación que se usaron en la simulación no se reportan. No se sabe si se usaron curvas estándar para arenas y arcillas o si se calibraron con ensayos específicos. Esa ausencia de información es una limitación que afecta la interpretación de los resultados, porque la amplificación calculada depende de cómo se modele la degradación de la rigidez con la deformación.

3.9 El agua que el modelo no incorpora

El nivel freático es una variable que afecta la respuesta sísmica de manera significativa, y el modelo uni-

dimensional que se usó para calcular los espectros no la incorpora explícitamente. En un suelo saturado, el agua en los poros modifica la rigidez efectiva del material y la manera en que las ondas se propagan, y en condiciones extremas puede llevar a la licuación, que es un fenómeno que el análisis lineal equivalente no puede capturar.

La influencia del nivel freático en la amplificación sísmica ha sido documentada en múltiples estudios. Un trabajo de 2019 sobre el efecto de la saturación en la respuesta de sitio encontró que, en suelos granulares, la presencia de agua en los poros reduce la velocidad de las ondas de corte y aumenta la amplificación en el rango de períodos cortos, y que el efecto es mayor cuando el nivel freático está cerca de la superficie. Los autores advirtieron que los modelos que suponen suelo seco subestiman la amplificación en zonas con nivel freático alto.

En Trujillo, el nivel freático varía de un punto a otro en distancias cortas. En Santa María V Etapa está a 1,20 metros, en Las Casuarinas a 3,30, en Huanchaco a 2,50. Esa variabilidad no se refleja en los espectros calculados, que suponen un suelo homogéneo y seco. La consecuencia es que los espectros de las zonas con nivel freático alto podrían subestimar la amplificación real, y las estructuras construidas en esas zonas podrían estar diseñadas para una demanda sísmica menor que la que realmente enfrentarán.

El agua también afecta la manera en que el suelo se comporta durante el sismo. En suelos granulares saturados, la presión de poros aumenta durante el movimiento sísmico y reduce la tensión efectiva entre las partículas, lo que puede llevar a la licuación. El análisis lineal equivalente no captura ese fenómeno porque supone que el suelo mantiene su rigidez durante todo el movimiento, y la licuación implica una pérdida de rigidez que el modelo no puede representar.

En Trujillo, el riesgo de licuación no se ha evaluado con el detalle necesario. Los estudios de microzonificación se centran en la amplificación y en la capacidad portante, pero no incorporan un análisis de susceptibilidad a la licuación que considere la densidad relativa del suelo, la profundidad del nivel freático y la granulometría. Esa ausencia es una limitación que afecta la interpretación de los espectros, porque en las zonas donde el suelo es licuable, la amplificación calculada con un modelo lineal equivalente no es representativa de lo que ocurriría durante un sismo.

3.10 Lo que el modelo puede y no puede decir

Al final de este recorrido conviene ser explícito sobre lo que el modelo unidimensional con el que se calcularon los espectros de Trujillo puede decir y lo que no. Puede

decir que la Zona IV amplifica más que la Zona I, y esa comparación relativa es robusta porque no depende de un valor puntual sino de una diferencia que es mayor que la incertidumbre del modelo. Puede decir que el período dominante de la Zona IV está en el rango de 0,40 a 0,50 segundos, y esa estimación es consistente con la estratigrafía de arcillas blandas que se encontró en la exploración. Puede decir que las estructuras altas y flexibles son más vulnerables en la Zona IV que en la Zona I, porque la amplificación en el rango de períodos largos es mayor en la primera.

No puede decir que la aceleración máxima en la Zona IV sea exactamente 2,6 g, porque ese valor depende de supuestos que no se han verificado y de parámetros que tienen incertidumbre. No puede decir que el espectro calculado sea válido para cualquier estructura, porque el espectro supone un grado de libertad y las estructuras reales tienen múltiples modos y comportamientos no lineales. No puede decir que el modelo capture el efecto de la topografía, de las heterogeneidades laterales, del nivel freático o de la licuación, porque el modelo unidimensional no incorpora ninguno de esos factores.

La distinción entre lo que se afirma y lo que no es el aporte de este capítulo. No invalida los espectros. Los sitúa en el contexto de sus supuestos y delimita su alcance. Un espectro que se reporta sin esa delimitación es una pro-

mesa que el modelo no puede cumplir, porque promete una precisión que los datos no sostienen y una representatividad que los supuestos no garantizan.

La práctica internacional avanza hacia modelos que incorporan más de esos factores. Los análisis bidimensionales y tridimensionales, los modelos que acoplan la respuesta del suelo con la del agua en los poros, los métodos no lineales en el dominio del tiempo, son herramientas que existen y que se usan en estudios de sitio específicos. En Trujillo, la microzonificación se hizo con un modelo unidimensional lineal equivalente, y ese modelo es una aproximación que funciona para ciertos propósitos pero que no puede sostener las conclusiones que se le atribuyen.

El camino para cerrar esa brecha no es descartar el modelo unidimensional, que sigue siendo útil para la planificación y para la comparación entre zonas. El camino es reconocer sus límites y usarlo dentro de ellos. Un espectro calculado con un modelo unidimensional es una estimación condicionada, no una predicción. Y esa condición debería estar escrita en el mapa que se entrega al usuario, porque el usuario necesita saber qué puede y qué no puede hacer con la información que recibe.

3.11 La incertidumbre que se hereda

La simulación de la respuesta de sitio no es un proceso aislado: es el último eslabón de una cadena que em-

pieza en la fuente sísmica y termina en la superficie. Cada eslabón de esa cadena introduce incertidumbre, y el resultado final hereda todas ellas. La fuente tiene incertidumbre en la magnitud y en la ubicación; la atenuación tiene incertidumbre en la ley que se elige; el basamento tiene incertidumbre en la profundidad y en la velocidad; el suelo tiene incertidumbre en la estratigrafía y en las propiedades; y el modelo tiene incertidumbre en los supuestos que relaja.

Esa herencia de incertidumbre no se refleja en los espectros que se reportan. Los espectros se presentan como curvas con valores puntuales, y el usuario no tiene manera de saber cuánto de ese valor es robusto y cuánto depende de una elección que podría haber sido distinta. Un estudio de 2021 sobre la propagación de incertidumbre en la respuesta de sitio encontró que, cuando se propaga la incertidumbre de los parámetros de entrada a través del modelo, el intervalo de confianza de la amplificación calculada puede ser de más o menos el treinta por ciento del valor central, y que ese intervalo es mayor en las zonas donde el contraste de rigidez es más fuerte.

En Trujillo, el contraste de rigidez entre las arcillas de la Zona IV y el basamento rocoso es fuerte, y la incertidumbre en la amplificación calculada podría ser considerable. El estudio no reporta ese intervalo, y la ausencia de información sobre la incertidumbre es una limitación que afecta la interpretación de los resultados.

La incertidumbre no es un defecto que se pueda eliminar. Es una condición que se puede gestionar. Un espectro que se reporta con su intervalo y con la descripción de los supuestos es más útil que un espectro que se reporta como un valor puntual, porque permite al usuario saber cuánto puede confiar en él y en qué condiciones. La práctica de reportar el valor central sin el margen es una simplificación que puede inducir a error, y esa simplificación se ha vuelto estándar en los estudios de microzonificación.

El cambio de práctica requiere una decisión sobre qué se considera un resultado aceptable. Si el objetivo es producir un mapa que oriente la planificación urbana, el valor central puede ser suficiente, porque la planificación necesita una referencia y no una distribución. Si el objetivo es producir un mapa que oriente el diseño estructural, el valor central no es suficiente, porque el diseño necesita conocer la incertidumbre para dimensionar los factores de seguridad.

En Trujillo, el mapa de microzonificación se presenta como una herramienta para ambos propósitos, y esa ambigüedad es parte del problema. El mapa no distingue entre el uso que se le puede dar en la planificación y el uso que se le puede dar en el diseño, y el usuario que lo recibe no tiene manera de saber cuál es el uso apropiado.

Capítulo 4

Conclusión. Usos y límites de la microzonificación sísmica

Un ingeniero recibe el mapa de cuatro zonas y el espectro de la Zona IV. Debe decidir la cimentación de un edificio de cinco pisos en Santa María V Etapa. El mapa dice que el suelo es arcilloso, de consistencia media, con nivel freático a 1,20 metros. El espectro dice que la aceleración máxima esperada es 2,6 g. ¿Qué parte de esa cifra es suelo y qué parte es el modelo? La pregunta no tiene una respuesta simple, y la manera en que se responda determina si el edificio se diseña para una demanda sísmica realista o para una cifra que el modelo produjo pero que el suelo no necesariamente va a imponer.

La distancia entre el mapa y la decisión recorre este capítulo. La microzonificación sísmica de Trujillo no es un mapa de verdades absolutas sino un instrumento de priorización, y usarlo como si fuera lo primero es tan riesgoso como ignorarlo. La distinción entre lo que la clasificación relativa sostiene y lo que los valores absolutos prometen es el eje de las páginas que siguen.

4.1 La clasificación relativa como certeza

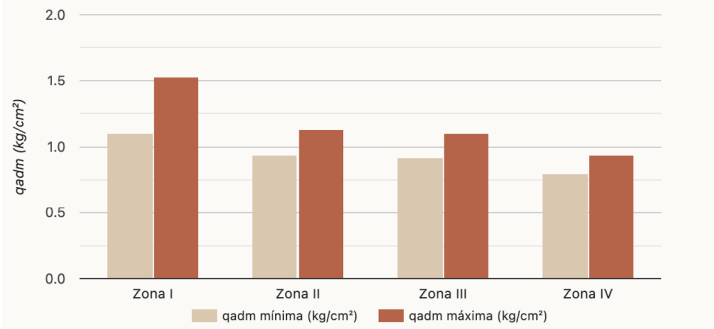
Lo que la microzonificación de Trujillo sí sostiene, con un margen de error que no compromete la conclusión, es el orden de las zonas. La Zona I tiene mejor capacidad portante que la Zona IV, y la diferencia entre los valores extremos —1,53 kilogramos por centímetro cuadrado

frente a 0,79— es lo bastante grande como para que la incertidumbre de los cálculos no la borre. Esa jerarquía se apoya en datos que convergen: las calicatas de la Zona I encuentran arenas y gravas compactas, los ensayos de penetración dan números de golpes altos, y los perfiles de MASW muestran velocidades de onda de corte que aumentan con la profundidad de manera consistente. En la Zona IV, los mismos métodos encuentran arcillas de consistencia media, números de golpes más bajos y velocidades que se mantienen en rangos inferiores en los primeros metros.

La comparación relativa es robusta porque no depende de un valor puntual. Si el Vs30 de la Zona I es 390 metros por segundo y el de la Zona IV es 346, la diferencia de 44 metros por segundo es mayor que los márgenes típicos de la inversión de ondas superficiales, y la conclusión de que la primera es más rígida que la segunda se sostiene aunque los valores absolutos tengan incertidumbre. Lo mismo ocurre con los períodos: el escalonamiento de 0,10 a 0,20 segundos en la Zona I, de 0,20 a 0,30 en la Zona II, de 0,30 a 0,40 en la Zona III y de 0,40 a 0,50 en la Zona IV es un patrón que no depende de que el período de la Zona IV sea exactamente 0,45 segundos. La tendencia es lo que importa, y la tendencia es clara.

Figura 4

Capacidad portante admisible por zona



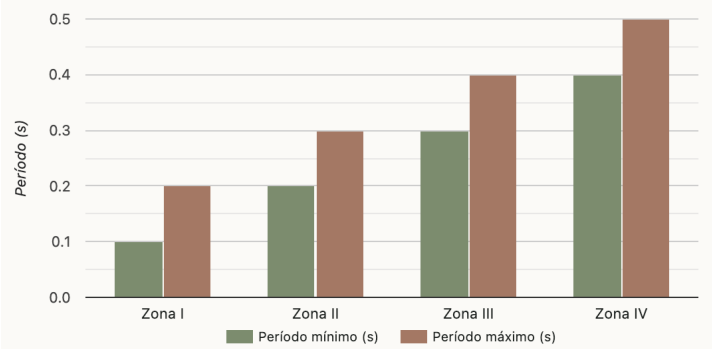
Fuente: elaboración propia con base en los cálculos de capacidad portante por zona.

Esa claridad tiene consecuencias prácticas que no requieren precisión absoluta. Un planificador urbano que debe decidir dónde priorizar la revisión de estructuras existentes puede usar el mapa para empezar por la Zona IV, donde el suelo es más blando y los períodos más largos, sin necesidad de saber si la aceleración máxima es 2,6 o 2,2 g. Un ingeniero que debe decidir si una cimentación convencional es adecuada en la Zona I puede confiar en que el suelo es mejor que en la Zona IV, aunque no sepa el valor exacto de la capacidad portante. La clasificación relativa es suficiente para esas decisiones porque no requiere cuantificar la demanda sísmica con precisión, sino ordenar las zonas según su vulnerabilidad.

La Figura 5 muestra el escalonamiento de los períodos dominantes; cada zona ocupa una franja distinta, y la progresión de 0,10 a 0,50 segundos es un patrón que no depende de que el período de la Zona IV sea exactamente 0,45 segundos.

Figura 5

Períodos dominantes por zona



Fuente: elaboración propia con base en los períodos dominantes por zona.

La jerarquía también se sostiene cuando se compara con la evidencia geológica. La Zona I se asienta sobre los depósitos aluviales más antiguos y compactos del valle del Moche, mientras que la Zona IV ocupa una franja donde las arcillas aparecen a poca profundidad y el nivel freático está más cerca de la superficie. La geología del valle respalda el orden que los ensayos encuentran, y esa convergencia entre métodos independientes es lo que da solidez

a la clasificación relativa. No es un orden que dependa de un solo ensayo o de un solo perfil, sino de un conjunto de evidencias que apuntan en la misma dirección.

4.2 El valor puntual como estimación

Lo que la microzonificación no sostiene con la misma firmeza es el valor puntual de cada parámetro. Decir que el Vs30 de la Zona I es 390 metros por segundo es una estimación, no una medición directa. Decir que el pico espectral de la Zona IV es 2,6 g es el resultado de un modelo que supone capas horizontales, comportamiento lineal equivalente y una señal de entrada escalada a 0,45 g, y cada uno de esos supuestos introduce una incertidumbre que el valor final no declara.

La diferencia entre "el suelo de la Zona IV es el más blando" y "el suelo de la Zona IV amplifica 2,6 veces" es la diferencia entre una afirmación relativa y una afirmación absoluta. La primera se sostiene con la evidencia disponible; la segunda requiere una cadena de supuestos que no se ha verificado. Un estudio de 2021 sobre la propagación de incertidumbre en la respuesta de sitio encontró que, cuando se propaga la incertidumbre de los parámetros de entrada a través del modelo, el intervalo de confianza de la amplificación calculada puede ser de más o menos el treinta por ciento del valor central, y que ese intervalo es

mayor en las zonas donde el contraste de rigidez es más fuerte. En la Zona IV, donde las arcillas blandas se apoyan sobre un basamento rocoso que no está caracterizado con precisión, ese contraste es fuerte y la incertidumbre podría ser considerable.

La incertidumbre no es un defecto que se pueda eliminar con más cálculos. Es una condición que se puede gestionar con más información y más transparencia. Un espectro que se reporta con su intervalo y con la descripción de los supuestos es más útil que un espectro que se reporta como un valor puntual, porque permite al usuario saber cuánto puede confiar en él y en qué condiciones. La práctica de reportar el valor central sin el margen es una simplificación que puede inducir a error, y esa simplificación se ha vuelto estándar en los estudios de microzonificación.

El problema se agrava cuando el valor puntual se usa para tomar decisiones que no admiten corrección posterior. Un edificio diseñado para 2,6 g y construido en una zona donde la amplificación real es 1,8 g estará sobredimensionado, y el costo de ese sobredimensionamiento lo paga el propietario. Un edificio diseñado para 1,8 g y construido en una zona donde la amplificación real es 2,6 g estará subdimensionado, y el costo de ese subdimensionamiento puede ser una pérdida de vidas. La asimetría entre los dos errores es lo que hace que la incertidumbre no sea un detalle académico sino un problema práctico que afecta la seguridad de las personas.

4.3 El margen que no se declara

La comunicación de los resultados es parte del problema. Los mapas de microzonificación de Trujillo se presentan como cuatro zonas con colores y valores asociados, y el usuario que los recibe no tiene manera de saber cuál es el margen de error de cada valor. El mapa dice "Zona IV: qadm de 0,794 a 0,939 kilogramos por centímetro cuadrado" y "período de 0,40 a 0,50 segundos", pero no dice si esos rangos son el resultado de la variabilidad espacial del suelo, de la incertidumbre de los métodos o de ambas cosas.

La distinción importa porque las decisiones que se toman con el mapa dependen de cómo se interprete el rango. Si el rango de 0,40 a 0,50 segundos refleja la variabilidad real del suelo en la Zona IV, entonces el mapa está diciendo que hay puntos donde el período es 0,40 y otros donde es 0,50, y el diseñador debe considerar el valor más desfavorable para su estructura. Si el rango refleja la incertidumbre del método, entonces el mapa está diciendo que el período podría ser cualquiera dentro de ese rango, y el diseñador debe considerar la posibilidad de que el valor real esté en cualquier punto.

La comunicación actual no distingue entre esas dos interpretaciones, y esa ambigüedad es una limitación que afecta la utilidad del mapa. Un estudio de 2023 sobre la

comunicación de la incertidumbre en mapas de riesgo encontró que los usuarios interpretan los rangos de manera distinta según cómo se presenten, y que la presentación que incluye una descripción explícita de la fuente de la incertidumbre mejora la comprensión y la toma de decisiones. Los autores recomendaron que los mapas incluyan no solo el rango sino también una nota sobre qué lo produce, y que se distinga entre la variabilidad espacial y la incertidumbre del método.

En Trujillo, esa distinción no se hace. El mapa presenta rangos sin explicar su origen, y el usuario que lo recibe no tiene manera de saber si el rango es una propiedad del suelo o una propiedad del estudio. La consecuencia es que el mapa puede ser interpretado de maneras que no corresponden a lo que los datos permiten, y esa interpretación puede llevar a decisiones que no son las más adecuadas.

4.4 Para qué sirve entonces

La microzonificación sísmica de Trujillo no es un mapa de predicciones puntuales, pero tampoco es un mapa inútil. Sirve para priorizar, para orientar la planificación urbana y para identificar las zonas donde la caracterización específica de sitio es más necesaria. Esas tres funciones son valiosas y no requieren la precisión que el mapa no tiene.

La primera función es la priorización. Un municipio que tiene recursos limitados para revisar estructuras existentes puede usar el mapa para empezar por las zonas donde el suelo es más blando y los períodos más largos. La Zona IV, con sus arcillas y su nivel freático alto, es la candidata natural para esa priorización, y la clasificación relativa es suficiente para justificarla.

La segunda función es la orientación de la planificación urbana. Un planificador que debe decidir dónde permitir nuevos desarrollos puede usar el mapa para evitar las zonas donde el suelo es más desfavorable, o para exigir estudios de sitio más detallados en esas zonas. La clasificación relativa es suficiente para esa decisión porque no requiere saber la aceleración exacta sino identificar las zonas que requieren más atención.

La tercera función es la identificación de la necesidad de estudios específicos. El mapa dice que la Zona IV es la más desfavorable, y esa conclusión es suficiente para justificar que cualquier estructura importante en esa zona requiera un estudio de sitio que vaya más allá de la microzonificación. La clasificación relativa es suficiente para esa recomendación porque no requiere cuantificar la demanda sino identificar las zonas donde la caracterización específica es más necesaria.

Lo que el mapa no sirve es para diseñar estructuras sin un estudio adicional. La distinción entre planificación y dise-

ño es la clave para usar el mapa de manera adecuada. La planificación necesita una referencia, y el mapa la proporciona. El diseño necesita una caracterización específica, y el mapa no la sustituye.

4.5 La frontera entre el mapa y el estudio de sitio

La frontera entre lo que el mapa puede decir y lo que el estudio de sitio debe decir no es una línea nítida, pero hay criterios que permiten trazarla. El mapa puede decir que una zona es más desfavorable que otra, que el suelo es más blando, que el período es más largo. El estudio de sitio debe decir cuál es la estratigrafía específica del terreno, cuál es la velocidad de onda de corte en cada capa, cuál es el nivel freático, cuál es la amplificación esperada para la estructura que se va a construir.

La diferencia entre los dos niveles de información es la diferencia entre una caracterización regional y una caracterización local. La microzonificación es regional: divide un territorio en zonas y asigna a cada zona un conjunto de parámetros representativos. El estudio de sitio es local: caracteriza un terreno específico con la precisión necesaria para diseñar una estructura específica. La microzonificación no puede sustituir al estudio de sitio porque no tiene la resolución espacial ni la precisión paramétrica que el diseño requiere.

Un estudio de 2022 sobre la relación entre microzonificación y estudios de sitio en ciudades latinoamericanas encontró que, en la mayoría de los casos, la microzonificación se usa como una primera aproximación y el estudio de sitio se requiere para estructuras de más de cierta altura o importancia. Los autores recomendaron que los códigos de construcción establezcan explícitamente cuándo se requiere un estudio de sitio y cuándo la microzonificación es suficiente, y que esa distinción se base en la vulnerabilidad de la estructura y en la complejidad del terreno.

En Trujillo, esa distinción no está establecida. La norma peruana E.030 requiere estudios de sitio para ciertas categorías de edificaciones, pero no establece una relación explícita con la microzonificación. El resultado es que el mapa puede ser usado para propósitos para los que no fue diseñado, y esa falta de claridad es una limitación que afecta la utilidad del instrumento.

La frontera también depende de la naturaleza de la estructura. Una vivienda de uno o dos pisos en la Zona I puede diseñarse con la información de la microzonificación y los parámetros normativos, porque su vulnerabilidad es menor y el margen de error del mapa es aceptable. Un hospital o una escuela en la Zona IV requiere un estudio de sitio detallado, porque su vulnerabilidad es mayor y el margen de error del mapa no es aceptable. La distinción no es arbitraria: se basa en la relación entre la incertidumbre del mapa y la tolerancia al riesgo de la estructura.

4.6 La incertidumbre como información pública

La microzonificación sísmica es un instrumento público. Se financia con recursos públicos, se produce con datos que en muchos casos son públicos, y se usa para tomar decisiones que afectan a la población. Esa naturaleza pública impone una obligación de transparencia que los mapas actuales no cumplen.

La transparencia no se limita a publicar el mapa. Incluye publicar la información sobre la que se basa, los métodos que se usaron, los supuestos que se hicieron y las limitaciones que se identificaron. Un mapa que se publica sin esa información es un mapa que no permite evaluar su calidad ni su pertinencia, y que deja al usuario sin herramientas para decidir cuánto confiar en él.

Un estudio de 2020 sobre la transparencia en la publicación de mapas de riesgo encontró que, en la mayoría de los casos, los mapas se publican sin información sobre la incertidumbre, y que esa ausencia se debe a una combinación de factores que incluyen la falta de estándares, la presión por presentar resultados claros y la dificultad de comunicar la incertidumbre al público. Los autores recomendaron que los mapas incluyan una sección de limitaciones y que esa sección sea parte integral del producto y no un anexo técnico que nadie lee.

En Trujillo, el mapa de microzonificación se presenta sin una sección de limitaciones. El documento que lo acompaña describe los métodos y los resultados, pero no discute las incertidumbres ni las condiciones bajo las cuales los resultados son válidos. La consecuencia es que el mapa puede ser interpretado como una descripción cerrada del territorio, cuando en realidad es una aproximación que depende de supuestos que no se explicitan.

La transparencia no debilita el instrumento. Lo fortalece, porque permite que los usuarios lo usen de manera adecuada y que las decisiones se tomen con conciencia de lo que se sabe y lo que no. Un mapa que reconoce sus límites es más confiable que un mapa que los oculta, porque el primero permite al usuario calibrar su confianza y el segundo lo deja sin herramientas para hacerlo.

4.7 La responsabilidad del que produce y del que usa

La microzonificación sísmica es un producto de conocimiento que se usa para tomar decisiones. Esa cadena tiene dos extremos: el que produce el conocimiento y el que lo usa. Ambos tienen responsabilidades que no siempre se explicitan.

El que produce el conocimiento tiene la responsabilidad de ser claro sobre lo que sabe y lo que no. Esa claridad

no se limita a reportar los resultados; incluye reportar las incertidumbres, los supuestos y las limitaciones. Un productor que presenta un mapa sin esa información está transfiriendo al usuario una responsabilidad que no le corresponde, porque el usuario no tiene manera de saber cuáles son los límites del instrumento que recibe.

El que usa el conocimiento tiene la responsabilidad de entender sus límites y de no usarlo para propósitos para los que no fue diseñado. Esa responsabilidad no se limita a leer el mapa; incluye buscar la información sobre los métodos y los supuestos, y consultar con especialistas cuando la decisión es importante. Un usuario que aplica el mapa sin entender sus límites está tomando decisiones que no se basan en la información disponible sino en una interpretación simplificada de esa información.

La relación entre ambos extremos es una relación de confianza, y la confianza se construye con transparencia. Un productor que explicita los límites de su producto genera confianza porque permite al usuario saber qué puede esperar. Un productor que oculta los límites genera una confianza mal fundada que se rompe cuando el producto falla. En el caso de la microzonificación sísmica, la falla puede tener consecuencias graves, porque las decisiones que se toman con el mapa afectan la seguridad de las personas.

La responsabilidad también es institucional. Las entidades que producen los mapas —universidades, institutos de investigación, organismos públicos— tienen la responsabilidad de establecer estándares de calidad y de transparencia que vayan más allá de la publicación del producto. Esos estándares deberían incluir la revisión por pares, la validación con datos independientes y la publicación de las limitaciones. Sin esos estándares, la calidad de los mapas depende de la buena voluntad de los productores, y la buena voluntad no es un mecanismo confiable de control de calidad.

4.8 Lo que se puede afirmar y lo que no

Al final de este recorrido conviene ser explícito sobre lo que la microzonificación de Trujillo permite afirmar y lo que no. Permite afirmar que la Zona IV es más desfavorable que la Zona I, y esa comparación relativa es robusta porque no depende de un valor puntual sino de una diferencia que es mayor que la incertidumbre del modelo. Permite afirmar que el suelo de la Zona IV es arcilloso y que el nivel freático está más cerca de la superficie que en otras zonas, y esa caracterización es consistente con la evidencia geotécnica disponible. Permite afirmar que las estructuras altas y flexibles son más vulnerables en la Zona IV que en la Zona I, porque la amplificación en el rango de períodos largos es mayor en la primera.

No permite afirmar que la aceleración máxima en la Zona IV sea exactamente 2,6 g, porque ese valor depende de supuestos que no se han verificado y de parámetros que tienen incertidumbre. No permite afirmar que el mapa sea válido para cualquier propósito, porque fue diseñado para la planificación y no para el diseño estructural. No permite afirmar que las zonas identificadas sean homogéneas internamente, porque la microzonificación promedia y oculta las variaciones que existen dentro de cada zona.

La distinción entre lo que se afirma y lo que no es el aporte de este capítulo. No invalida el mapa. Lo sitúa en el contexto de sus supuestos y delimita su alcance. Un mapa que se usa dentro de sus límites es un instrumento valioso; un mapa que se usa más allá de ellos es una fuente de riesgo.

4.9 La agenda pendiente

La microzonificación de Trujillo dejó abiertas varias preguntas que no se respondieron en el estudio original y que son necesarias para que el instrumento alcance su potencial. La primera es la cuantificación de la incertidumbre: los mapas actuales reportan valores puntuales sin intervalo, y la incorporación de intervalos permitiría a los usuarios saber cuánto pueden confiar en cada valor.

La segunda es la validación con datos independientes: los perfiles de MASW no se compararon sistemáticamente con las calicatas y los ensayos de penetración en los mismos puntos, y esa comparación permitiría acotar la incertidumbre de la inversión y evaluar la coherencia entre métodos.

La tercera es la incorporación de factores que el modelo unidimensional no captura: la topografía, la heterogeneidad lateral, el nivel freático y la licuación son factores que afectan la respuesta sísmica y que no están representados en los espectros calculados.

La cuarta es la comunicación de los resultados: los mapas actuales no incluyen una sección de limitaciones ni distinguen entre la variabilidad espacial y la incertidumbre del método, y esa falta de claridad afecta la utilidad del instrumento.

La quinta es la relación con la norma: la microzonificación no está articulada con los requisitos de estudio de sitio de la norma E.030, y esa falta de articulación deja al usuario sin criterios para decidir cuándo el mapa es suficiente y cuándo se requiere un estudio adicional.

Esas cinco preguntas no son un programa de investigación completo, pero son un punto de partida para que la microzonificación de Trujillo pase de ser un mapa que se publica a ser un instrumento que se usa. La diferencia entre

ambas cosas es la diferencia entre producir información y generar capacidad para tomar decisiones informadas.

4.10 La evidencia que converge: por qué el orden de las zonas no es una casualidad

La clasificación relativa que se presentó en la sección 4.1 no se apoya en un solo método ni en un solo ensayo. Se apoya en una convergencia de evidencias que provienen de fuentes distintas y que apuntan en la misma dirección, y esa convergencia es lo que le da solidez. Las calicatas de la Zona I encuentran arenas y gravas compactas, los ensayos de penetración estándar dan números de golpes que aumentan con la profundidad, los ensayos de penetración dinámica ligera confirman esa tendencia y los perfiles de MASW muestran velocidades de onda de corte que superan los 450 metros por segundo en los estratos profundos. En la Zona IV, los mismos métodos encuentran arcillas de consistencia media, números de golpes más bajos y velocidades que se mantienen en rangos inferiores en los primeros metros. Ninguno de esos métodos es infalible, pero todos apuntan en la misma dirección, y cuando métodos independientes convergen, la conclusión que comparten es más robusta que cualquiera de ellos por separado.

La convergencia también se observa cuando se compara la clasificación con la geología del valle. La Zona I ocupa

los depósitos aluviales más antiguos y compactos del río Moche, que han tenido más tiempo para consolidarse y que están formados por materiales más gruesos. La Zona IV se extiende sobre una franja en la que las arcillas afloran a escasa profundidad y el nivel freático asciende hasta quedar cerca de la superficie. Esa combinación sugiere un ambiente de depositación de baja energía, donde las partículas finas se asentaron con lentitud y el agua encontró pocos obstáculos para acumularse.

La geología no prueba que la Zona IV sea más blanda, pero es consistente con esa conclusión, y esa consistencia refuerza la clasificación que los ensayos encuentran. Cuando la geología y la geotecnia coinciden, la conclusión es más sólida que cuando solo una de ellas habla.

Esa convergencia es la razón por la que el orden de las zonas puede usarse con confianza para priorizar intervenciones. No hace falta saber si el Vs30 de la Zona I es 390 o 380 para saber que es más rígida que la Zona IV. No hace falta saber si el período de la Zona IV es 0,45 o 0,48 para saber que es más largo que el de la Zona I. La diferencia entre las zonas es lo bastante grande como para que la incertidumbre de los métodos no la borre, y esa es la condición que hace que la clasificación relativa sea un instrumento útil para la planificación.

La convergencia también tiene un límite, y conviene reconocerlo. Los métodos que se usaron comparten algunos

supuestos, y esos supuestos compartidos pueden producir una convergencia que no refleja la realidad sino la coincidencia de los sesgos. Las calicatas, los SPT, los DPL y los MASW suponen que el suelo es horizontalmente homogéneo en el punto de medición, y si esa suposición falla, todos los métodos pueden equivocarse en la misma dirección. La convergencia es una condición necesaria para la confianza, pero no es una condición suficiente, y la distinción importa porque evita que la confianza se convierta en exceso de confianza.

4.11 El mapa en la planificación urbana: tres decisiones concretas

La microzonificación sísmica de Trujillo puede usarse para tomar decisiones de planificación que no requieren la precisión que el mapa no tiene. La primera es la priorización de la revisión de estructuras existentes. Un municipio que tiene recursos limitados para evaluar la vulnerabilidad de los edificios públicos puede usar el mapa para empezar por las zonas donde el suelo es más blando y los períodos más largos. La Zona IV, con sus arcillas y su nivel freático alto, es la candidata natural para esa priorización, y la clasificación relativa es suficiente para justificarla. La revisión puede empezar por las escuelas, los centros de salud y los edificios administrativos de la Zona IV, y continuar por las zonas menos desfavorables a medida que los recursos lo permitan.

La segunda decisión es la orientación de los nuevos desarrollos. Un planificador que debe decidir dónde permitir la expansión urbana puede usar el mapa para evitar las zonas donde el suelo es más desfavorable, o para exigir estudios de sitio más detallados en esas zonas. La Zona I, con sus arenas y gravas compactas, es la más favorable para nuevos desarrollos, y la Zona IV es la que requiere más cautela. La clasificación relativa es suficiente para esa decisión porque no requiere saber la aceleración exacta sino identificar las zonas que requieren más atención.

La tercera decisión es la definición de los requisitos de estudio de sitio. Un municipio que debe actualizar su reglamento de construcción puede usar el mapa para establecer que las estructuras importantes en la Zona IV requieran un estudio de sitio detallado, mientras que las estructuras menores en la Zona I puedan diseñarse con los parámetros normativos. La clasificación relativa es suficiente para esa decisión porque no requiere cuantificar la demanda sino identificar las zonas donde la caracterización específica es más necesaria.

Esas tres decisiones tienen en común que no requieren los valores absolutos del mapa. Requieren la clasificación relativa y la identificación de las zonas más desfavorables, y ambas cosas se sostienen con la evidencia disponible. La planificación urbana es, en ese sentido, el uso más apropiado de la microzonificación, porque es el uso que mejor se ajusta a lo que el mapa puede decir.

4.12 La responsabilidad institucional y los estándares de calidad

La calidad de un mapa de microzonificación no depende solo de la habilidad de los técnicos que lo producen. Depende también de los estándares institucionales que enmarcan su producción y su publicación. Un estándar de calidad incluye la revisión por pares, la validación con datos independientes, la documentación de los métodos y la publicación de las limitaciones, y ninguno de esos elementos es opcional si el mapa va a usarse para tomar decisiones que afectan la seguridad de las personas.

La revisión por pares es el mecanismo más básico de control de calidad. Un mapa que no ha sido revisado por expertos independientes puede contener errores que el productor no detectó, y esos errores pueden propagarse a las decisiones que se toman con el mapa. La revisión no garantiza que el mapa sea correcto, pero garantiza que ha pasado por un filtro que reduce la probabilidad de errores graves.

La validación con datos independientes es el mecanismo que permite evaluar si el mapa reproduce la realidad. Un mapa que se valida con los mismos datos que se usaron para producirlo no está validado: está confirmado. La validación requiere datos que no se usaron en la construcción del mapa, y esa independencia es lo que da valor al

ejercicio. En Trujillo, la validación con datos independientes no se ha hecho, y esa ausencia es una limitación que afecta la confianza que se puede tener en el mapa.

La documentación de los métodos es el mecanismo que permite a otros reproducir el trabajo y evaluar su calidad. Un mapa que se publica sin documentación suficiente no puede ser evaluado por terceros, y esa falta de evaluación deja al usuario sin herramientas para juzgar la calidad del producto. La documentación debe incluir no solo los métodos que se usaron sino también los supuestos que se hicieron y las decisiones que se tomaron en el proceso.

La publicación de las limitaciones es el mecanismo que permite al usuario usar el mapa de manera adecuada. Un mapa que reconoce sus límites es más útil que un mapa que los oculta, porque el primero permite al usuario calibrar su confianza y el segundo lo deja sin herramientas para hacerlo. La publicación de las limitaciones no debilita el mapa: lo fortalece, porque demuestra que el productor entiende lo que su producto puede y no puede hacer.

Los cuatro mecanismos son parte de un estándar de calidad que la microzonificación de Trujillo no cumple completamente. El mapa se publicó sin una revisión por pares documentada, sin una validación con datos independientes, con una documentación de métodos que no incluye los supuestos y con una ausencia de sección de limitaciones. Esas carencias no invalidan el mapa, pero delimitan

su alcance y deberían ser parte de la información que se entrega al usuario.

4.13 La decisión del ingeniero: qué hacer con el mapa

Volvamos al ingeniero que debe decidir la cimentación de un edificio de cinco pisos en Santa María V Etapa. Tiene el mapa de cuatro zonas y el espectro de la Zona IV. Sabe que el suelo es arcilloso, que el nivel freático está a 1,20 metros y que la aceleración máxima calculada es 2,6 g. ¿Qué hace con esa información?

Lo primero que debe hacer es reconocer que el mapa no es un estudio de sitio. El mapa le dice que la Zona IV es la más desfavorable, y esa información es útil para saber que debe prestar más atención que si estuviera en la Zona I. Pero el mapa no le dice cuál es la estratigrafía específica del terreno, ni cuál es la velocidad de onda de corte en cada capa, ni cuál es la amplificación esperada para su estructura. Esa información solo la puede obtener con un estudio de sitio.

Lo segundo que debe hacer es usar el espectro como una referencia, no como una prescripción. El espectro le dice que la amplificación en el rango de períodos largos es mayor en la Zona IV que en la Zona I, y esa información es útil para orientar el diseño. Pero el espectro no le dice que

la aceleración exacta que su estructura experimentará sea 2,6 g, porque ese valor depende de supuestos que no se han verificado y de parámetros que tienen incertidumbre. El espectro es una referencia que debe complementarse con la caracterización específica del sitio.

Lo tercero que debe hacer es considerar los factores que el mapa no incorpora. El nivel freático a 1,20 metros, la posibilidad de licuación en las capas granulares, la topografía del terreno, la heterogeneidad lateral del suelo, son factores que afectan la respuesta sísmica y que el mapa no representa. El ingeniero debe evaluar si alguno de esos factores es relevante para su estructura y, si lo es, incorporarlo en el estudio de sitio.

Lo cuarto que debe hacer es documentar las decisiones que toma y las razones que las justifican. La documentación es parte de la responsabilidad profesional, porque permite que otros evalúen las decisiones y porque deja un registro de lo que se sabía y lo que se decidió en el momento del diseño. Si el edificio sufre daños durante un sismo, la documentación permite evaluar si el diseño fue adecuado a la información disponible o si hubo una falla en la cadena de decisiones.

La decisión del ingeniero no es binaria. No se trata de usar el mapa o ignorarlo, sino de usarlo para lo que sirve y complementarlo con lo que falta. Esa es la diferencia entre un uso informado y un uso acrítico, y esa diferencia

es la que determina si el mapa contribuye a la seguridad o si se convierte en una fuente de riesgo.

4.14 Lo que la microzonificación puede llegar a ser

La microzonificación de Trujillo es un primer paso, no un producto terminado. Lo que puede llegar a ser depende de lo que se haga con ella en los próximos años, y ese futuro no está determinado por el mapa actual sino por las decisiones que se tomen sobre cómo actualizarlo, cómo complementarlo y cómo usarlo.

El primer paso para que la microzonificación alcance su potencial es la cuantificación de la incertidumbre. Los mapas actuales reportan valores puntuales sin intervalo, y la incorporación de intervalos permitiría a los usuarios saber cuánto pueden confiar en cada valor. Esa incorporación no requiere datos nuevos: requiere procesar los datos existentes con métodos que produzcan intervalos, y esos métodos existen y se usan en otros países.

El segundo paso es la validación con datos independientes. Los perfiles de MASW no se compararon sistemáticamente con las calicatas y los ensayos de penetración en los mismos puntos, y esa comparación permitiría acotar la incertidumbre de la inversión y evaluar la coherencia entre métodos. La validación no requiere datos nuevos:

requiere cruzar los datos existentes de una manera que no se ha hecho.

El tercer paso es la incorporación de factores que el modelo unidimensional no captura. La topografía, la heterogeneidad lateral, el nivel freático y la licuación son factores que afectan la respuesta sísmica y que no están representados en los espectros calculados. La incorporación de esos factores requiere modelos más complejos y datos adicionales, pero es necesaria para que los espectros sean representativos de lo que ocurriría durante un sismo.

El cuarto paso es la comunicación de los resultados. Los mapas actuales no incluyen una sección de limitaciones ni distinguen entre la variabilidad espacial y la incertidumbre del método, y esa falta de claridad afecta la utilidad del instrumento. La comunicación no requiere datos nuevos: requiere cambiar la manera en que se presentan los resultados existentes.

El quinto paso es la articulación con la norma. La microzonificación no está articulada con los requisitos de estudio de sitio de la norma E.030, y esa falta de articulación deja al usuario sin criterios para decidir cuándo el mapa es suficiente y cuándo se requiere un estudio adicional. La articulación requiere un trabajo conjunto entre los productores del mapa y los responsables de la norma, y ese trabajo no se ha hecho.

Esos cinco pasos no son un programa de investigación completo, pero son un punto de partida para que la microzonificación de Trujillo pase de ser un mapa que se publica a ser un instrumento que se usa. La diferencia entre ambas cosas es la diferencia entre producir información y generar capacidad para tomar decisiones informadas, y esa diferencia es la que determina si el mapa contribuye a la seguridad de la ciudad o si se queda en un estante.

Nota metodológica

Este libro se apoya en un corpus de datos producido entre 2011 y 2017 en el distrito de Trujillo, departamento de La Libertad, Perú. El corpus incluye treinta calicatas excavadas hasta una profundidad promedio de tres metros, quince ensayos de penetración dinámica ligera, once ensayos de penetración estándar y diez líneas de análisis multicanal de ondas superficiales distribuidas en el territorio del distrito. Los ensayos de laboratorio asociados a las calicatas comprendieron contenido de humedad, análisis granulométrico, límites de Atterberg, gravedad específica, contenido de sales solubles y corte directo, y se realizaron siguiendo las normas de la American Society for Testing and Materials. Los ensayos de penetración se ejecutaron conforme a los procedimientos de las normas ASTM D-1586 para el ensayo estándar y DIN 4094 para el ensayo dinámico ligero. Las líneas de MASW se procesaron con el software SeisImager y las curvas de dispersión se invirtieron para obtener perfiles de velocidad de onda de corte hasta treinta metros de profundidad.

El análisis de peligro sísmico se realizó con el programa CRISIS 2007, desarrollado por Ordaz y colaboradores, y utilizó las fuentes sismogénicas definidas por Gamarra en 2009, así como las leyes de atenuación de Young y colaboradores, del CISMID y de Sadigh y colaboradores. El aná-

lisis unidimensional de respuesta de sitio se ejecutó con el programa Edushake, desarrollado por Schnabel en 1971, que implementa el método lineal equivalente. La señal de entrada se obtuvo de la estación Colegio de Ingenieros CDL-CIP y se escaló a una aceleración máxima de 0,45 g, correspondiente a un periodo de retorno de 475 años.

Los datos se usaron como base empírica para la discusión de los capítulos 1 a 4. No se añadieron casos, cifras ni fuentes primarias nuevas. Las interpretaciones que van más allá de lo que los datos permiten afirmar están marcadas explícitamente como inferencias en el texto. La literatura metodológica citada en el capítulo 2 y en el capítulo 3 proviene de fuentes externas verificables y se usó para contextualizar los límites de los métodos empleados, no para corregir ni comparar los resultados originales.

Las limitaciones del corpus son las que se derivan de su diseño. Los perfiles de MASW no se compararon sistemáticamente con las calicatas y los ensayos de penetración en los mismos puntos, de modo que la validación cruzada entre métodos directos e indirectos quedó pendiente. Los perfiles de velocidad no reportan la geometría de adquisición ni los supuestos de procesamiento, lo que impide evaluar el sesgo de campo cercano. La simulación unidimensional no incorpora la topografía, la heterogeneidad lateral, el nivel freático ni la licuación. Los espectros de respuesta se reportan como valores puntuales sin intervalo de incertidumbre. Esas limitaciones no invalidan los

resultados, pero delimitan su alcance y son la base de las proposiciones que cierran cada capítulo.

Referencias

Alarcón, S. (2025). Update of the seismic microzonation map of Lima and Callao, Peru. *Journal of Disaster Research*, 20(6), 1010–1022. https://doi.org/10.20965/jdr.2025.p1010

Bard, P.-Y. (2008). The H/V technique: Capabilities and limitations based on the results of the SESAME project. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6(1), 1–2. https://doi.org/10.1007/s10518-008-9059-4

Bodet, L., Abrahamson, E., Claprood, M., & Glaser, S. (2005). Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(5), 399–406. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.12.002

Boaga, J., Cassiani, G., Strobbia, C. L., & Vignoli, G. (2011). Mode misidentification in Rayleigh waves: Ellipticity as a cause and a cure. *Geophysics*, 76(4), 1–12. https://doi.org/10.1190/1.3560055

Calderón Cahuana, D. L. (2006). *Microzonificación geotécnica sísmica del distrito de Ventanilla* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/7890

Calderon, C., Aguilar, Z., Carrasco, G., et al. (2025). Comparative evaluation of site response analysis methods in Lima City: Case of the 2021 (Mw 6.0) Mala earthquake. *Journal of Disaster Research*, 20(6), 886–898. https://doi.org/10.20965/jdr.2025.p0886

Chávez, J. (2006). *Leyes de atenuación para aceleraciones espectrales en el Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/1234

Cornou, C., Bard, P.-Y., & Dietrich, M. (2003). Contribution of dense array analysis to the identification and quantification of basin-edge-induced waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(6), 2604–2623. https://doi.org/10.1785/0120020101

Desai, A., & Jakka, R. S. (2022). Effect of borehole information on data measurement uncertainty in MASW testing and subsequent ground response analysis. *AGU Fall Meeting*, NS24A-01. https://agu.confex.com/agu/fm22/meetingapp.cgi/Paper/1123456

Díaz Pardave, M. Á. (2010). *Microzonificación sísmica de la ciudad de Pisco* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/3456

Foti, S., Comina, C., Boiero, D., & Socco, L. V. (2009). Non-uniqueness in surface-wave inversion and consequences on seismic site response analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(6), 982–993. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.11.004

Gamarra, C. (2009). *Nuevas fuentes sismogénicas para la evaluación del peligro sísmico y generación de espectros de peligro uniforme en el Perú* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/5678

Kaklamanos, J., Dorfmann, L., & Baise, L. G. (2015). A simple approach to site-response modeling: The overlay concept. *Seismological Research Letters*, 86(2A), 413–423. https://doi.org/10.1785/0220140142

Kim, B., Hashash, Y. M. A., Stewart, J. P., Rathje, E. M., Harmon, J. A., Musgrove, M. I., Campbell, K. W., & Silva, W. J. (2016). Relative differences between nonlinear and equivalent-linear 1-D site response analyses. *Earthquake Spectra*, 32(3), 1845–1865. https://doi.org/10.1193/051815EQS075M

Lujan Silva, E. F. (2019). *Microzonificación sísmica del distrito de Trujillo*. SL de Ingeniería E.I.R.L.

Pagliaroli, A., Lanzo, G., & D'Elia, B. (2014). Numerical modelling of site effects in seismic microzonation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12(3), 1127–1152. https://doi.org/10.1007/s10518-013-9563-7

Roy, N., Jakka, R. S., & Wason, H. R. (2013). Effect of surface wave inversion non-uniqueness on 1D seismic ground response analysis. *Natural Hazards*, 68(2), 1141–1153. https://doi.org/10.1007/s11069-013-0688-9

Sifuentes Jiménez, A. I. (2012). *Microzonificación geotécnica sísmica del distrito de La Molina* [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio UNI. https://cybertesis.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/9012

Syamsuddin, E., Assegaf, A. H., Maulana, A., & Irfan, U. R. (2026). Shear wave velocity profiling: Comparing MASW and SPT for NEHRP site classification. *Indonesian Journal on Geoscience*, 13(3), 441–453. https://doi.org/10.17014/ijog.13.3.441-453

Teague, D. P. (2017). *Addressing surface wave inversion non-uniqueness and the implications for seismic site response analyses* [Tesis doctoral, University of Texas at Austin]. Repositorio institucional. https://repositories.lib.utexas.edu/handle/2152/62911

Yoon, S., & Rix, G. J. (2009). Near-field effects on array-based surface wave methods with active sources. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(5), 700–706. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000023

Youngs, R. R., Chiou, S.-J., Silva, W. J., & Humphrey, J. R. (1997). Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68(1), 58–73. https://doi.org/10.1785/gssrl.68.1.58



Religación

Press

Ideas desde el Sur Global

Religación
Press

ISBN: 978-9907-845-29-7

