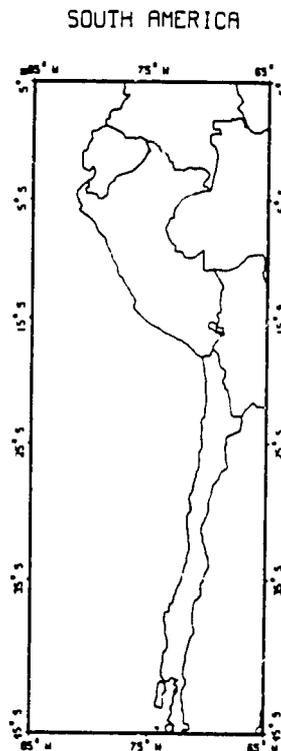


PN-AAT-510
41581

Preparacion de Modelos del Riesgo de Tsunamis y Mitigacion de Desastres: Peru y Chile



APPLIED

ENVIRONMENTAL

SCIENCES DIVISION

SA SCIENCE APPLICATIONS, INC.

PREPARACION DE MODELOS
DEL RIESGO DE TSUNAMIS Y
MITIGACION DE DESASTRES:
PERU Y CHILE

SAI-83/1426

Diciembre de 1983

Gerald T. Hebenstreit
y
Richard B. Lambert, Jr.
Applied Environmental Sciences Division



RESUMEN

El presente estudio demuestra el uso de un modelo numérico de acumulación e inundación de tsunamis para investigar la posible amenaza tsunamigénica que afrontan lugares costeros específicos en el Perú y Chile. En estudios anteriores se ha demostrado que estas regiones pudieran verse gravemente amenazadas por los tsunamis generados por terremotos en la región de la fosa de Perú-Chile. En este estudio se simuló la propagación de las olas tsunamigénicas a las aguas costeras y (posiblemente) a tierra firme para demostrar la gravedad de la amenaza que presentan tsunamis procedentes de distintas zonas.

Las simulaciones para cada zona costera se examinan individualmente y se formulan sugerencias para posibles medidas de mitigación utilizando los resultados de la simulación. En la sección final se resumen las conclusiones para cada lugar. También se esbozan distintos usos posibles de esta técnica en cierto número de etapas de la planificación de las medidas destinadas a mitigar los efectos de los tsunamis. Se tratan además cuestiones relacionadas con la aplicación de esta técnica a los países amenazados.

Este estudio se ha traducido al español. Se pueden obtener ejemplares solicitándolos a los autores y a la agencia financiadora. Se trata más detenidamente el estudio en el Informe de SAID No. SAI-83/1236, titulado "Preparación de modelos del riesgo de tsunamis y mitigación de desastres: Estudios de acumulación e inundación", por Hebenstreit y Whitaker (1983).

RECONOCIMIENTOS

Este estudio fue realizado al amparo del contrato PDC-0009-C-00-2041-00 para la Oficina de Asistencia Estadounidense en Casos de Desastre ocurridos en el Exterior, Agencia para el Desarrollo Internacional. Agradecemos al personal de OFDA, especialmente al Dr. Martin Howell y al Sr. Paul Krumpke, el apoyo y aliento que nos proporcionaron en esta labor.

También debemos dar las gracias al Dr. Richard B. Lambert Jr., de SAI, por su valiosa ayuda en editar y revisar este informe, a la Sra. Amy Morris por su considerable asistencia técnica en la elaboración de las técnicas para presentación de nuestros resultados y a la Sra. Robin Wagner y su personal del Centro de Preparación de Textos por su trabajo profesional de mecanografía y preparación de nuestro documento.

Este informe fue traducido al español por Linguamundi International, de McLean, Virginia. Damos las gracias especialmente a Art Nowaskey y su oficina por su excelente labor.

Debido a que este informe se ha encuadernado utilizando un dispositivo plástico de sujeción por presión, puede desmontarse fácilmente (aunque esperamos que no accidentalmente). Hemos optado por este método de encuadernación para que los lectores interesados puedan copiar la totalidad o partes de este informe. No solo aprobamos dicha reproducción sino que la fomentamos, en la esperanza de que aumente la utilidad de esta obra.

INDICE

<u>Sección</u>	<u>Página</u>
RESUMEN	i
RECONOCIMIENTOS	ii
1 INTRODUCCION	1-1
2 PREPARACION DE MODELOS DE TSUNAMIS - REGION DE LA FOSA DE PERU-CHILE	2-1
3 RESULTADOS DEL MODELO - ACUMULACION Y TERMINACION	3-1
3.1 LIMA, PERU	3-1
3.1.1 Historia de tsunamis	3-3
3.1.2 Simulaciones del riesgo	3-4
3.2 ARICA, CHILE	3-9
3.2.1 Historia de tsunamis	3-10
3.2.2 Simulaciones del riesgo	3-10
3.3 REPERCUSIONES	3-17
4 APLICACIONES A LA PLANIFICACION PARA CASOS DE DESASTRE	4-1
4.1 RESULTADOS Y APLICACIONES DEL MODELO	4-1
4.2 EVALUACIONES INTEGRALES DEL RIESGO	4-2
4.3 ANALISIS DE MITIGACION	4-3
4.4 SISTEMAS DE AVISO EN TIEMPO REAL	4-4
4.5 PLANIFICACION DE LAS RESPUESTAS EN CASOS DE DESASTRE	4-5
4.6 TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA	4-6
REFERENCIAS	R-1

Sección I
INTRODUCCION

La fosa de Perú-Chile, que se extiende a lo largo de la costa occidental de Sudamérica, es una región de intensa actividad sísmica. Los terremotos submarinos que ocurren en esta región pueden ocasionar rápidos movimientos del suelo oceánico que elevan o hacen descender la columna de agua sobre el lugar del terremoto. Esta breve perturbación de la corteza terrestre puede ocasionar uno de los fenómenos naturales más destructivos: el tsunami o maremoto.

Desde 1687, los tsunamis que se han originado en la fosa de Perú-Chile han ocasionado la muerte a más de 25.000 personas en Sudamérica. En fecha tan reciente como 1960, un tsunami produjo un terremoto submarino en la fosa de Perú-Chile que ocasionó la muerte a casi mil personas en todo el Pacífico (figura 1.1). El evento comenzó cuando el terremoto ocasionó un extenso movimiento del suelo marino en una región de más de 1000 kilómetros de longitud frente a la costa occidental de Chile. Se registraron a lo largo de la costa chilena olas de 10 a 20 metros de altura, mientras que en la costa del Japón se experimentaron olas de 4 a 6 metros de altura.

El presente informe analiza la prueba de un modelo matemático concebido para simular las características de la propagación de las olas y desarrollo de un tsunami que se origina en la zona de la fosa de Perú-Chile. Se identificaron seis zonas sísmicas diferentes y en cada zona se elaboró un modelo de un movimiento característico del fondo debido a un terremoto postulado. Simulando el movimiento de las olas hasta la interrupción en la plataforma, se identificaron las regiones costeras de alto riesgo tanto cerca como lejos de las zonas sísmicas. Luego se incluyeron en el modelo a un mayor nivel de detalle los riesgos potenciales para dos ciudades costeras: Lima, Perú y Arica, Chile.

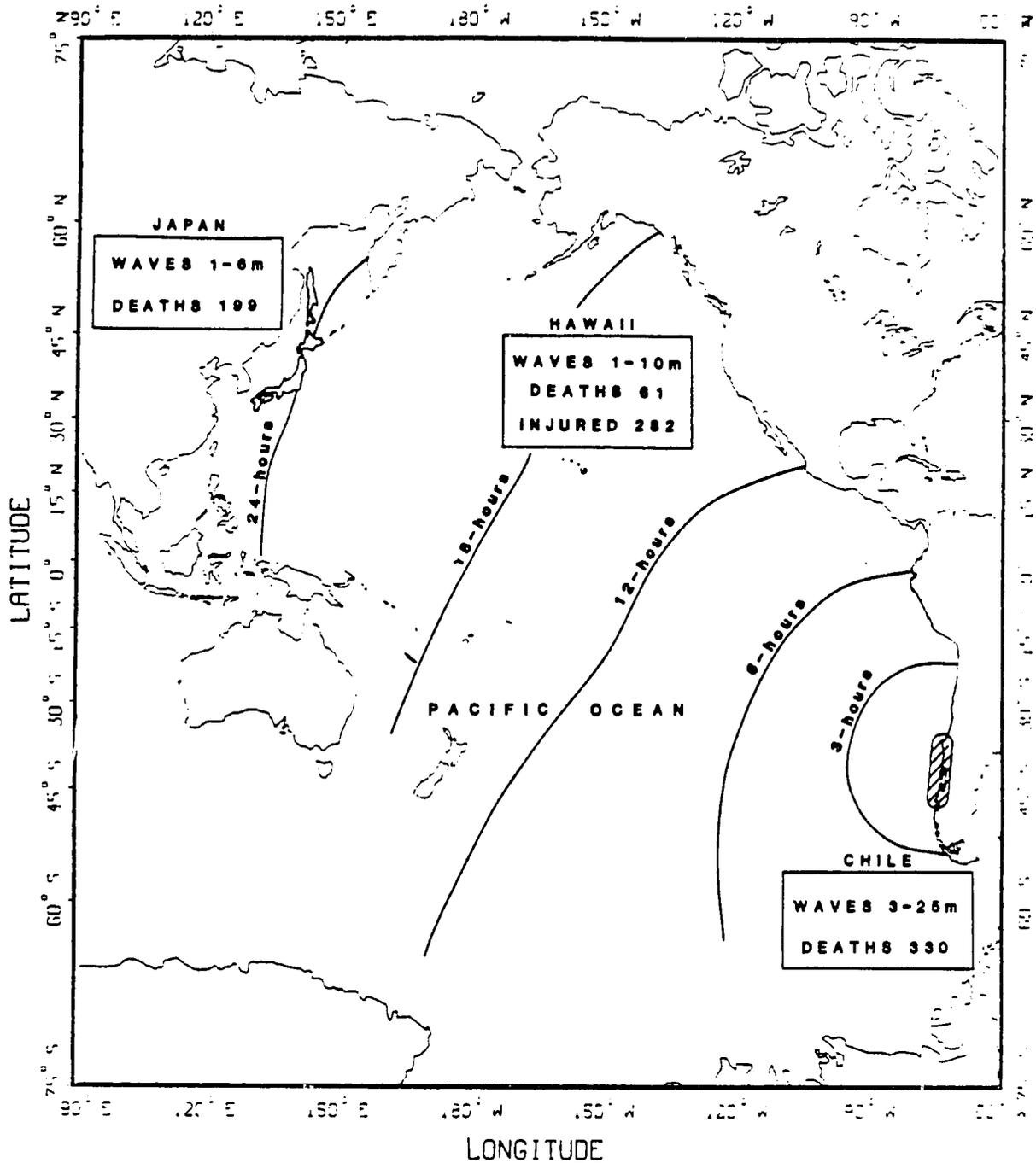


Figura 1.1 El tsunami chileno de 1960 fue uno de los más destructivos de que se tiene noticias. Las olas procedentes de la zona de origen (zona rayada frente a las costas de Chile) ocasionaron la muerte y destrucción hasta el Japón.

El presente informe está organizado de la siguiente manera:

- La sección 2 describe la región de la fosa de Perú-Chile y los enfoques generales utilizados para elaborar modelos de tsunamis para esta región.
- La sección 3 presenta e interpreta los resultados detallados para Lima, Perú y Arica, Chile y resume las repercusiones de estos resultados.
- La sección 4 aplica los resultados del modelo a regiones alrededor de Lima y Arica y traza la base para utilizar los resultados en la formulación de planes para aviso de tsunamis, mitigación de desastres y planificación de largo plazo. Se hacen sugerencias para utilizar localmente la capacidad de elaboración de modelos, con capacitación adecuada del personal local, a fin de actualizar y perfeccionar los planes de desastre según sea necesario.

Sección 2

PREPARACION DE MODELOS DE TSUNAMIS - REGION DE LA FOSA DE PERU-CHILE

Los tsunamis son olas de gravedad de la superficie oceánica de longitudes de ola largas. De ordinario son producidas por terremotos submarinos, cuyas olas avanzan rápidamente en aguas profundas (200 km/hora en agua de una profundidad de 4 km). Las alturas de ola pueden ser pequeñas y difíciles de detectar hasta que las olas pasan a aguas poco profundas pero, debido a que toda la columna de agua está en movimiento, estas olas contienen grandes cantidades de energía.

Pueden utilizarse modelos matemáticos del movimiento de fluidos para describir cómo se propagan las olas de un tsunami, cómo crecen y dónde donde es probable que ocasionen daños. Los datos introducidos en los modelos son los siguientes: clase de terremoto, dimensión del terremoto, movimiento de agua inicial resultante en las proximidades del terremoto y contornos del fondo oceánico y las zonas costeras afectadas. Los productos de los modelos son alturas de ola como funciones del tiempo en cualquier emplazamiento específico deseado. La calidad de la información producida por el modelo depende de la precisión de la topografía del fondo, el grado de incertidumbre en relacionar los parámetros sísmicos con los parámetros del movimiento del agua y el grado de aproximación de las ecuaciones del modelo.

Los modelos utilizados en este estudio no pronostican los terremotos. Ni vaticinan necesariamente que un determinado terremoto producirá un tsunami. Sin embargo, sí indican los efectos que es susceptible de producir un tsunami ocasionado por un terremoto en un determinado lugar en términos de alturas de ola y zonas de inundación en las regiones costeras especificadas.

Los terremotos tsunamigénicos que han ocurrido a lo largo de la fosa de Perú-Chile se ilustran en la figura 2.1. La figura 2.2 presenta zonas que han sido identificadas por los sismólogos como las más susceptibles de producir terremotos en el futuro. Estas no son predicciones, son estimaciones basadas en un análisis del registro histórico. El cuadro 2-1 presenta estas regiones de origen de terremotos, junto con información descriptiva.*

Se utilizan tres modelos separados para simular el tsunami desde que es producido hasta que termina (figura 2.3) -- EARTHQUAKE traduce los parámetros sísmicos prescritos a una perturbación inicial de la columna de agua y por tanto describe la producción del tsunami; 2) SEAWAVE describe la propagación resultante de la ola inicial basada en un modelo hidrodinámico y la topografía del fondo de la cuenca oceánica. (Cuando las olas se aproximan a las zonas costeras, este modelo identifica las regiones en las que los tsunamis son más susceptibles de convertirse en olas con capacidad destructiva); 3) SURGE II acepta las olas crecientes como entrada, describe su interacción con la topografía costera y de tierras bajas para determinar la altura final de las olas, las zonas que con mayor probabilidad serán inundadas y la intensidad de la inundación que pudiera ocurrir.

Una vez se determina la topografía del fondo con el grado de precisión requerido (o dentro de los límites de los datos disponibles), las entradas primarias del modelo son los parámetros sísmicos. En este estudio, se elabora un modelo de seis ejemplos diferentes (cuadro 2-1). Los efectos pronosticados de las olas por cada pasada de modelo en la costa sudamericana se presentan en la figura 2.4-2.9. Los datos numerados representan los lugares aproximados de los puntos a lo largo de la costa en los que se pronosticaron para cada simulación elevaciones

* La zona B se incluye como dos zonas más pequeñas: la zona norte va desde el extremo septentrional de la zona grande a la línea sólida superior en la figura 2.2; la zona sur va desde la línea sólida inferior al extremo meridional de la zona. No se prevén terremotos grandes de la región intermedia, que está montada sobre el giro en el continente.

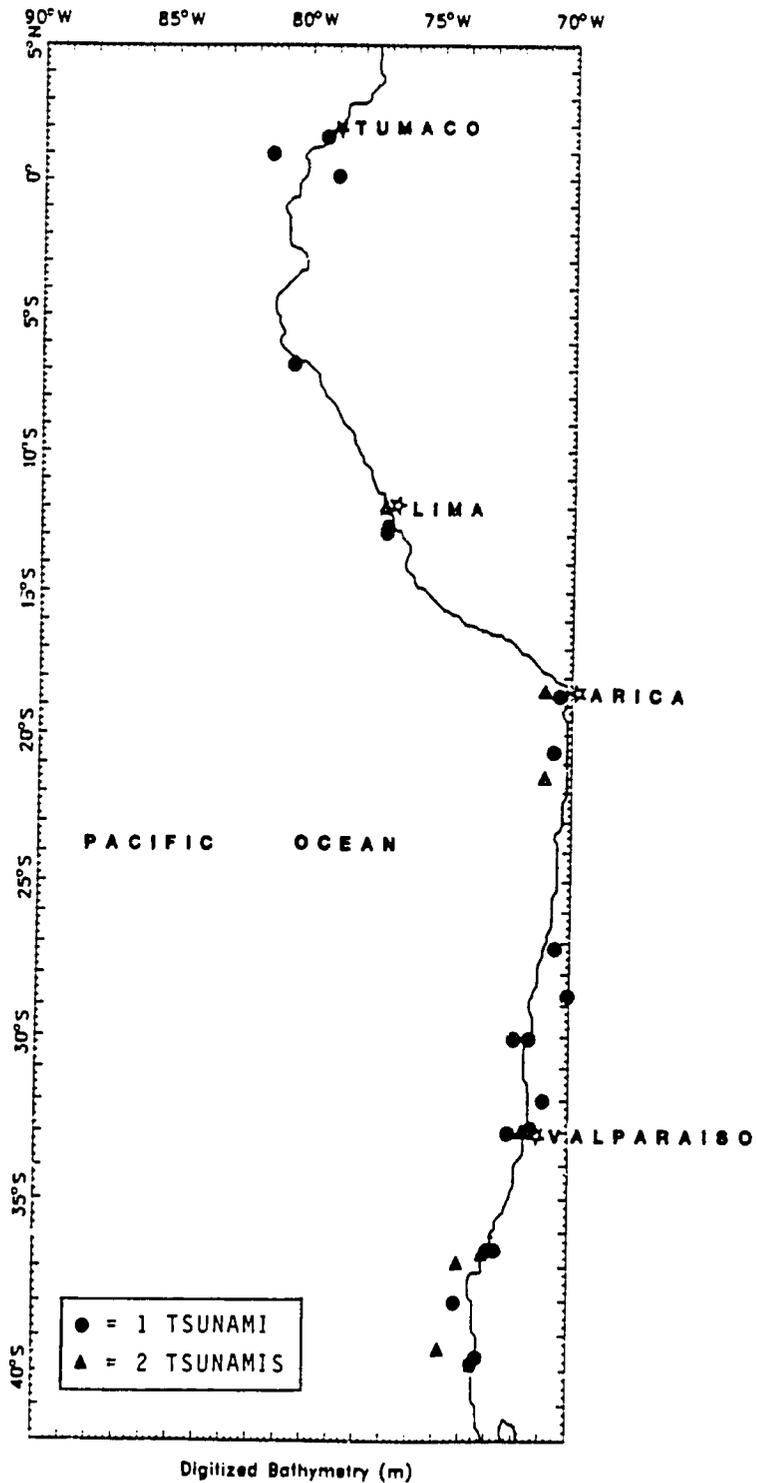


Figura 2.1 Los epicentros de los terremotos tsunamigénicos a lo largo de la costa occidental de Sudamérica se ilustran aquí por puntos. Un triángulo indica la fuente de más de un tsunami.

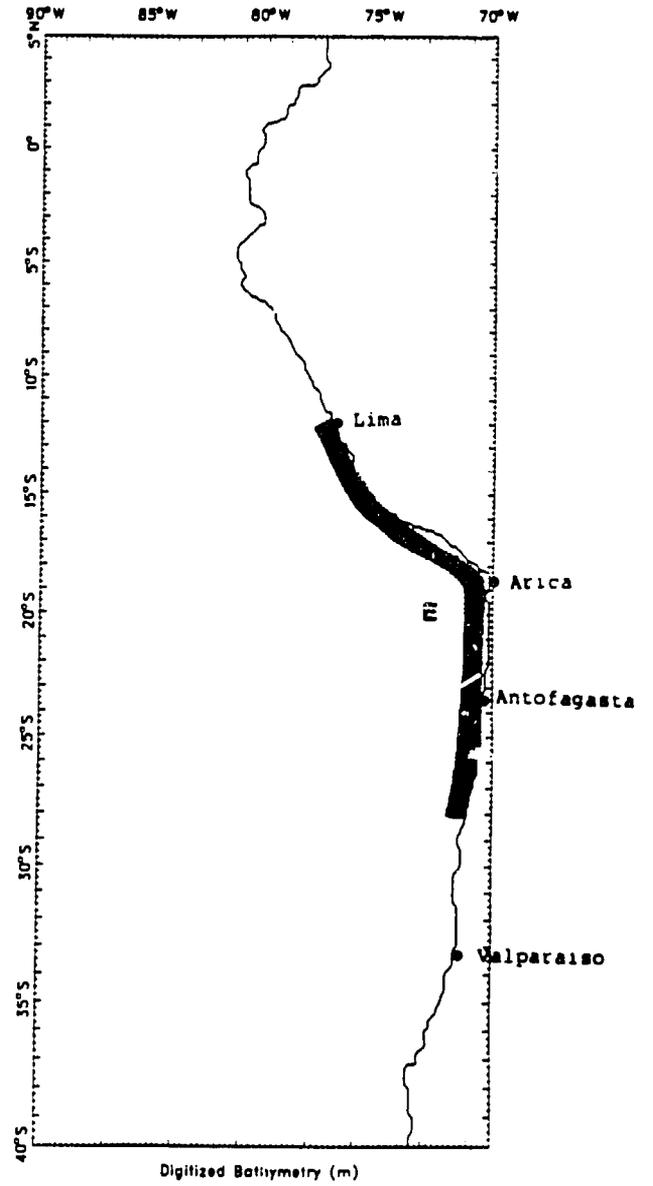
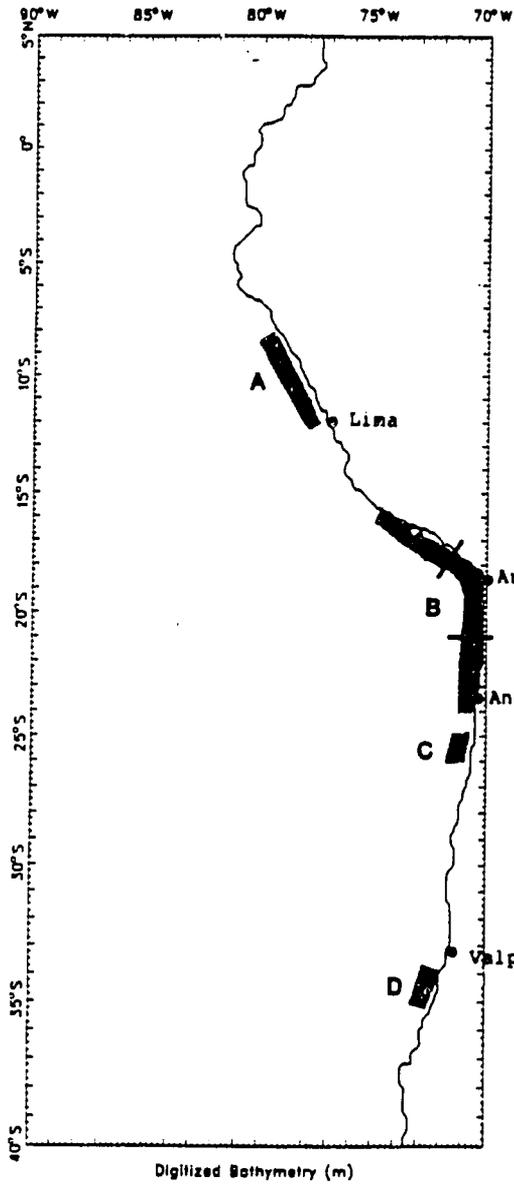


Figura 2.2. Lugares aproximados de las fuentes de terremotos hipotéticos que se han utilizado en este estudio.

Cuadro 2-1
Lugares posibles de generación de tsunamis

<u>Ejemplo</u>	<u>Zona orig.</u>	<u>Lugar</u>	<u>Latitude Range</u>	<u>Potenc. sísmico</u>	<u>Longitud (km)</u>	<u>Anchura (km)</u>	<u>Profund. (m)</u>	<u>Origen</u>
1	A	Centro Perú	8° - 12°S	Elevado	500	100	6000	Brady
2	B (Norte)	Norte Chile	16° - 24°S	Elevado	300	100	7000	McCann, et al (1978)
3	B (Sur)	Sur Perú	16° - 24°S	Elevado	300	100	7000	"
4	C	Copiapo, Chile	25° - 26°S	Moderado	125	125	6000	"
5	D	Valparaíso Chile	33° - 35°S	Moderado	150	125	5000-6000	"
6	E	Lima, Perú	12° - 28°S	Elevado	Depend. del tiempo (>2000 km)			Brady

2-5

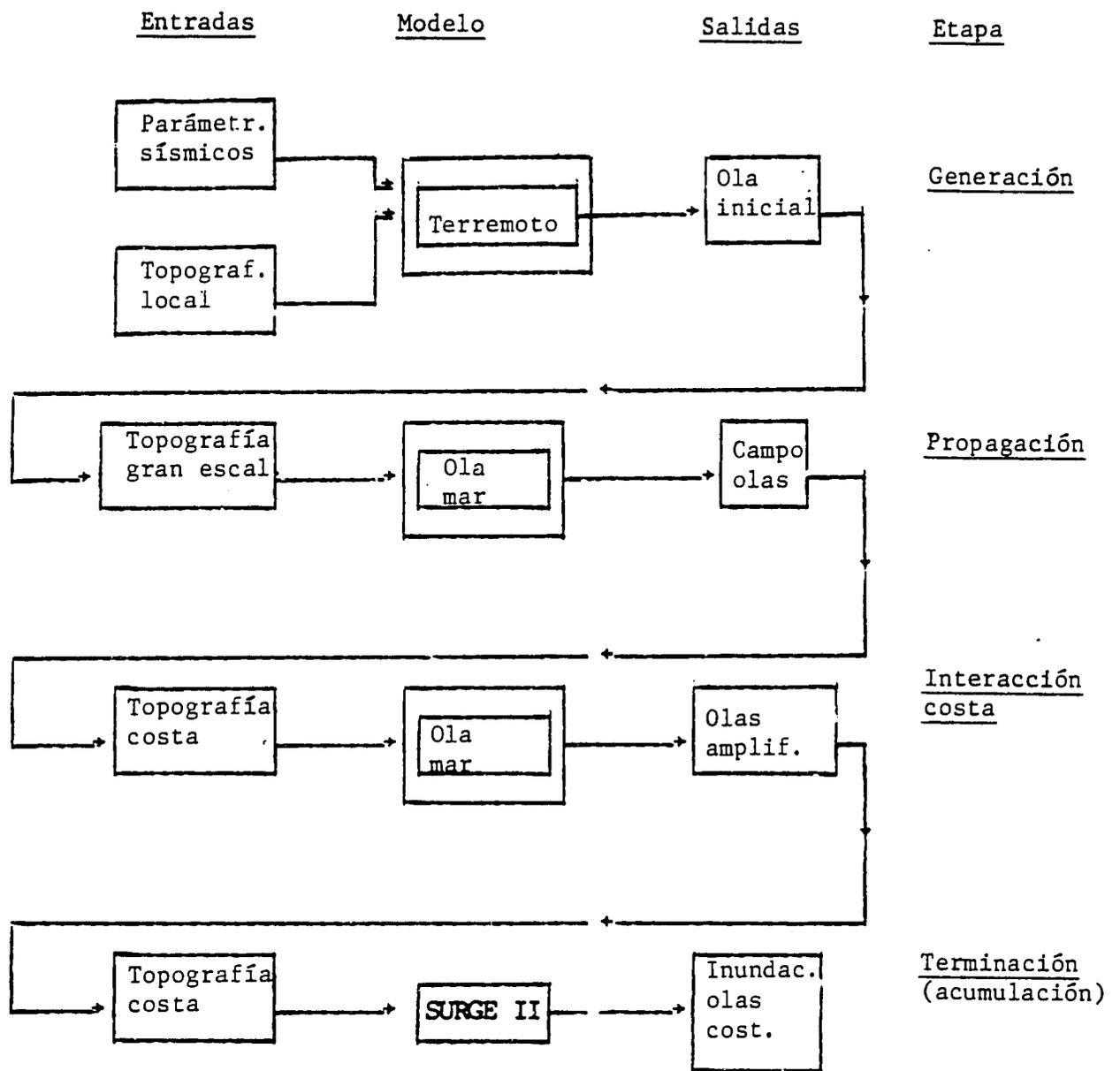


Figura 2.3. Diagrama de movimiento que presenta los pasos utilizados en la preparación de un modelo de la generación, propagación, interacción con la costa y terminación de un tsunami.

de ola máximas. Los segmentos de la costa cubiertos de rayas denotan lugares de elevaciones de ola que siempre están por encima del promedio para el caso.* Las porciones delineadas por puntos denotan zonas en las que las elevaciones máximas fueron al menos de un metro (siempre y cuando la elevación media fuera mayor de un metro para la pasada). Estos resultados indican solamente la interacción con la costa (con anterioridad a la inundación), y se resumen en el cuadro 2-2. Se desprende de este cuadro que, para los terremotos postulados en las zonas B y E, tanto Lima (Callao) como Arica serían afectadas por olas grandes. Lima también se vería muy amenazada por las olas procedentes de la zona A.

El presente estudio tiene por finalidad demostrar el uso de esta técnica para evaluar los riesgos de los tsunamis. Así, pues, los resultados ilustrados en las figuras 2.4-2.9 y el cuadro 2-2 llevaron a la selección de dos ciudades, Lima y Arica, para estudio adicional. Puesto que ambas de estas ciudades tienen largas historias de pérdidas ocasionadas por los tsunamis, proporcionan la oportunidad de demostración práctica del método y de desarrollo de información potencialmente útil. Para reducir los costos, se especificaron cuatro zonas de origen: las zonas A, B (Norte), B (Sur), y E. Los resultados del modelo se tratan minuciosamente en la sección 3.

* El valor promedio se obtuvo añadiendo las elevaciones máximas en cada punto numerado y dividiendo por el número total de puntos.

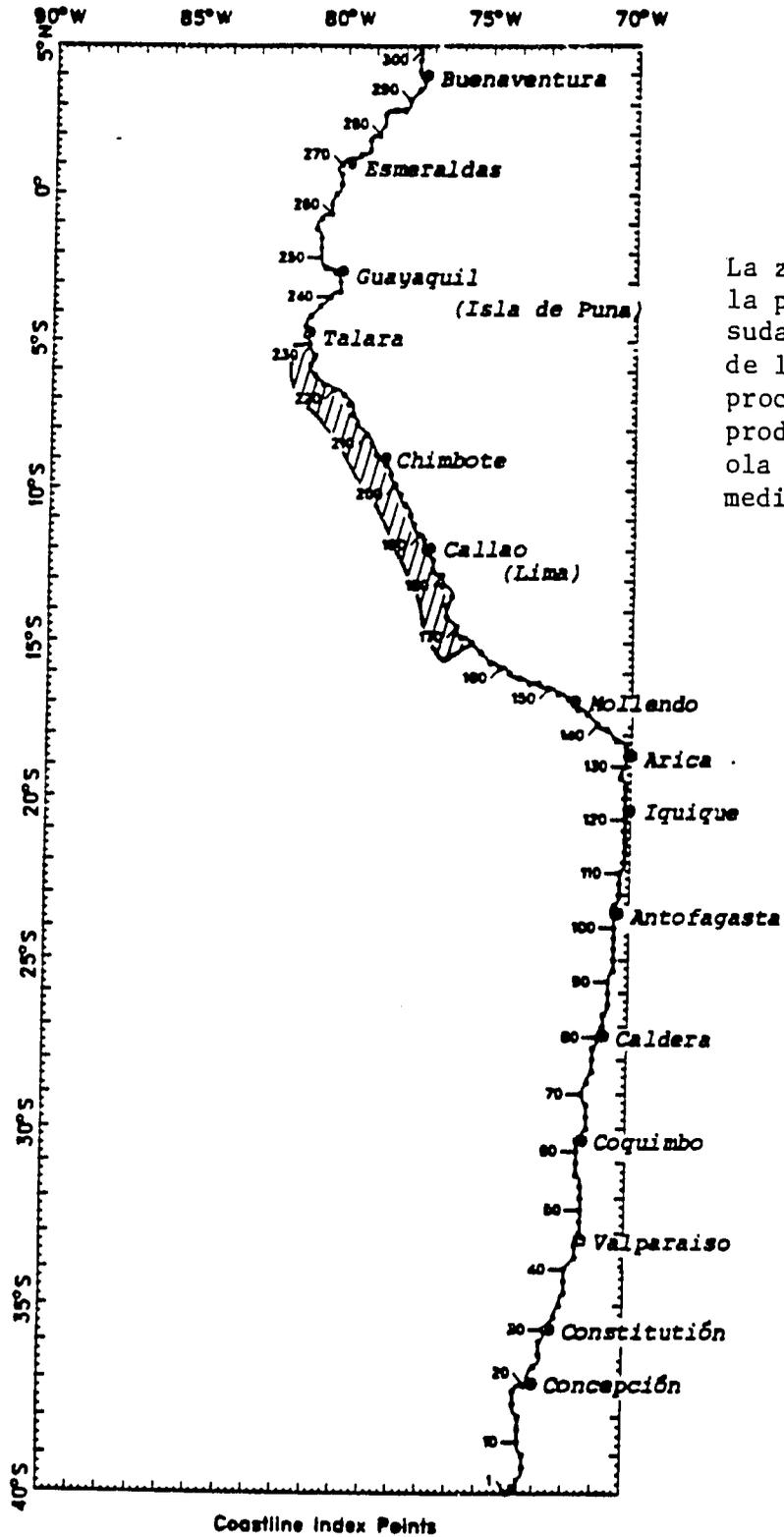


Figura 2.4

La zona de rayas denota la porción de la costa sudamericana a lo largo de la cual el tsunami procedente de la zona A produjo elevaciones de ola superiores al promedio.

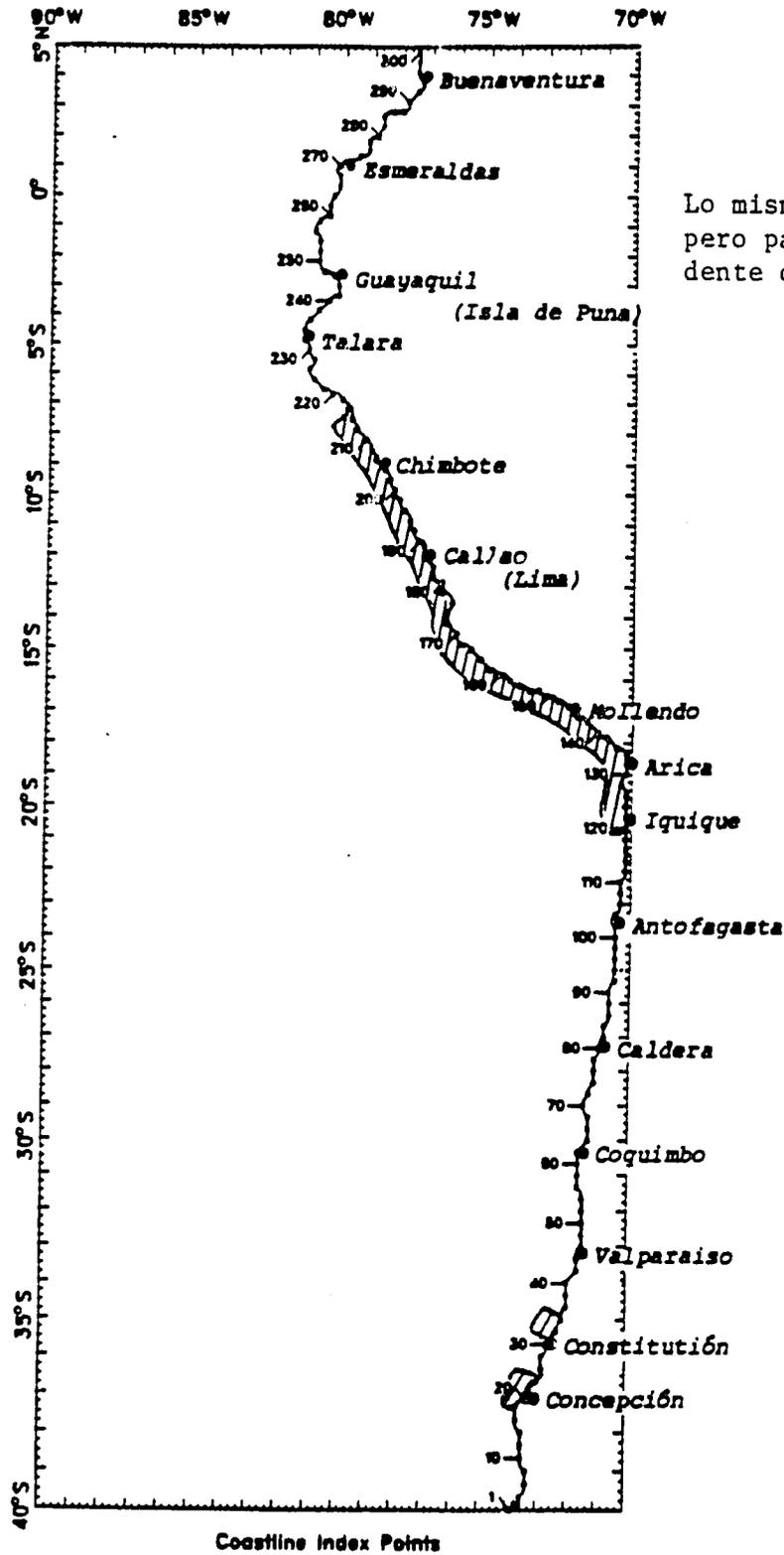


Figura 2.5

Lo mismo que la figura 2.4, pero para el tsunami procedente de la zona B (Norte).

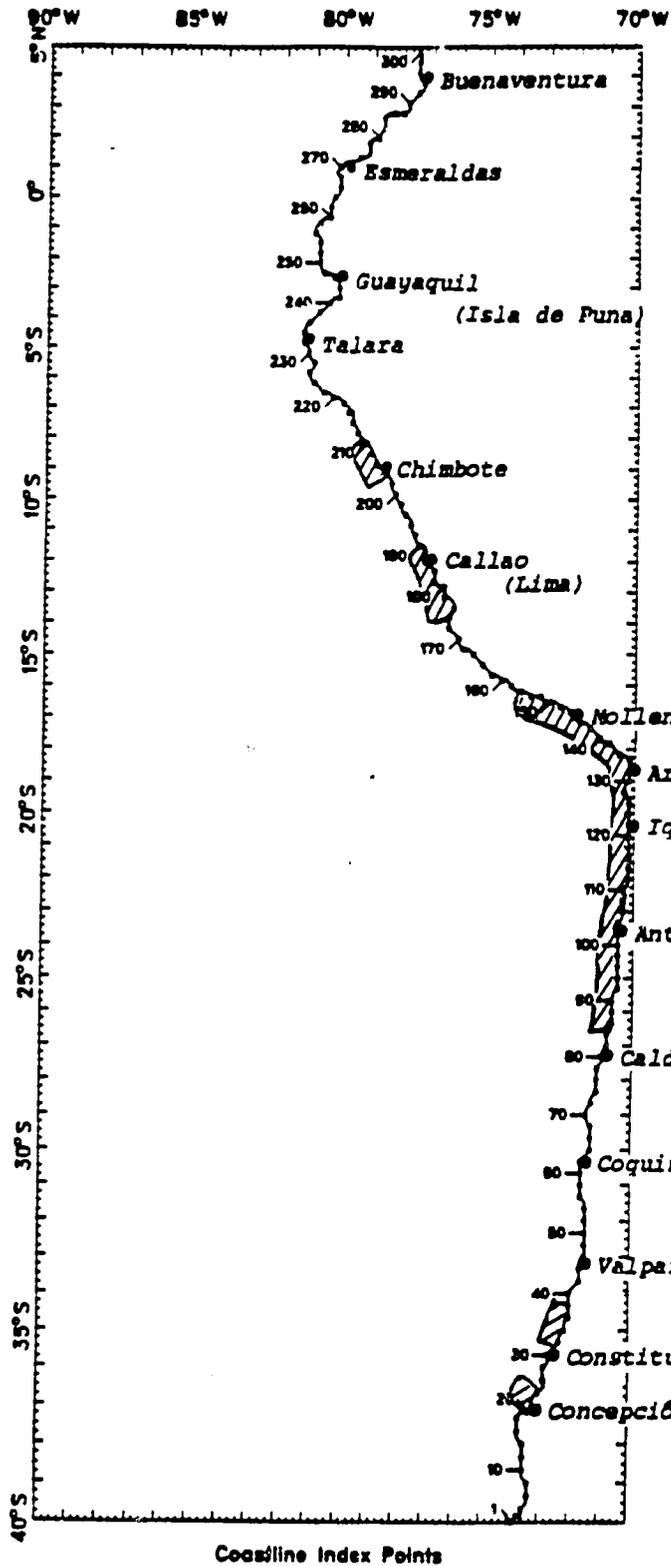


Figura 2.6

Lo mismo que la figura 2.4, pero para el tsunami procedente de la zona C.

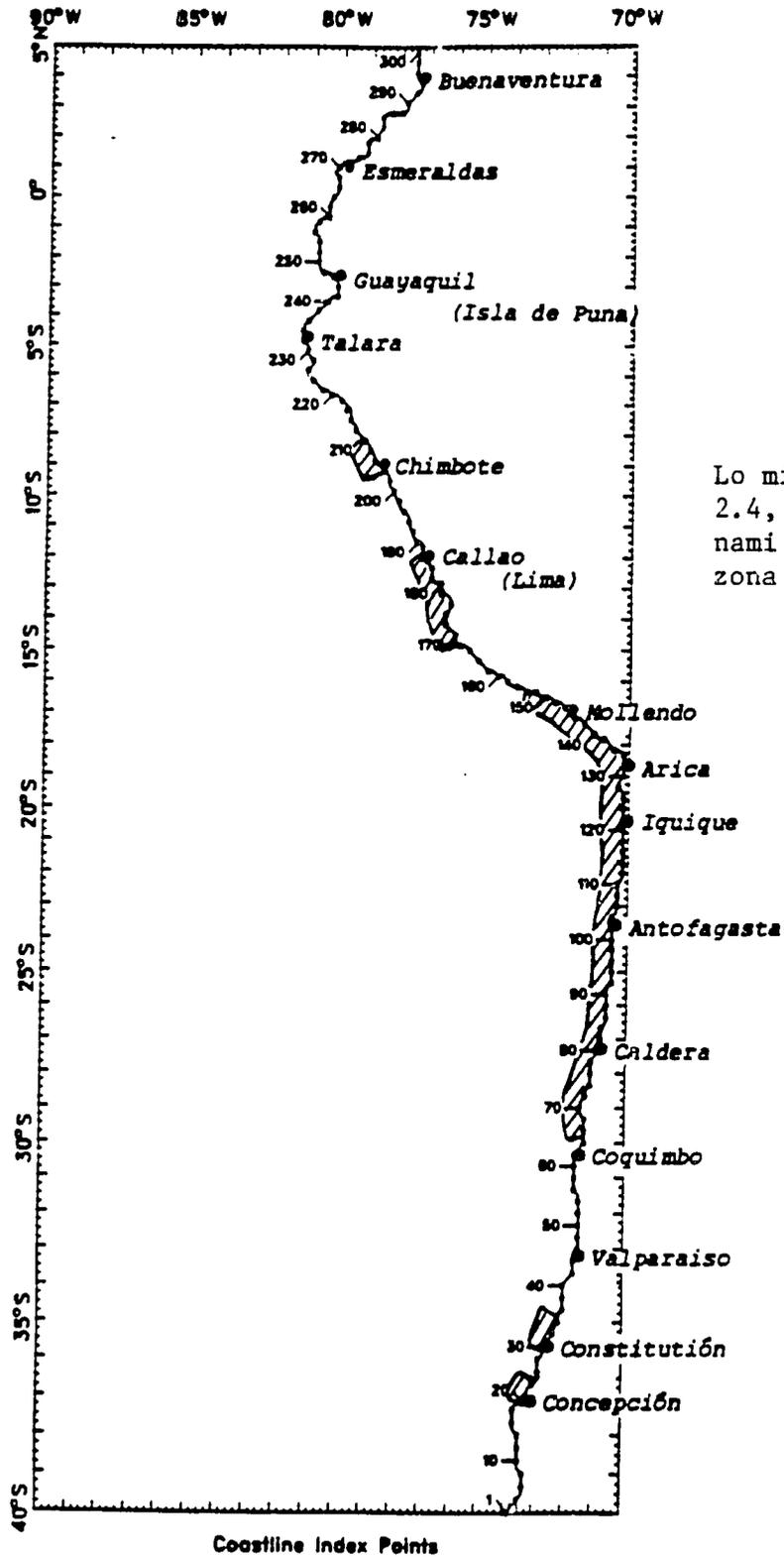


Figura 2.7

Lo mismo que la figura 2.4, pero para el tsunami procedente de la zona C.

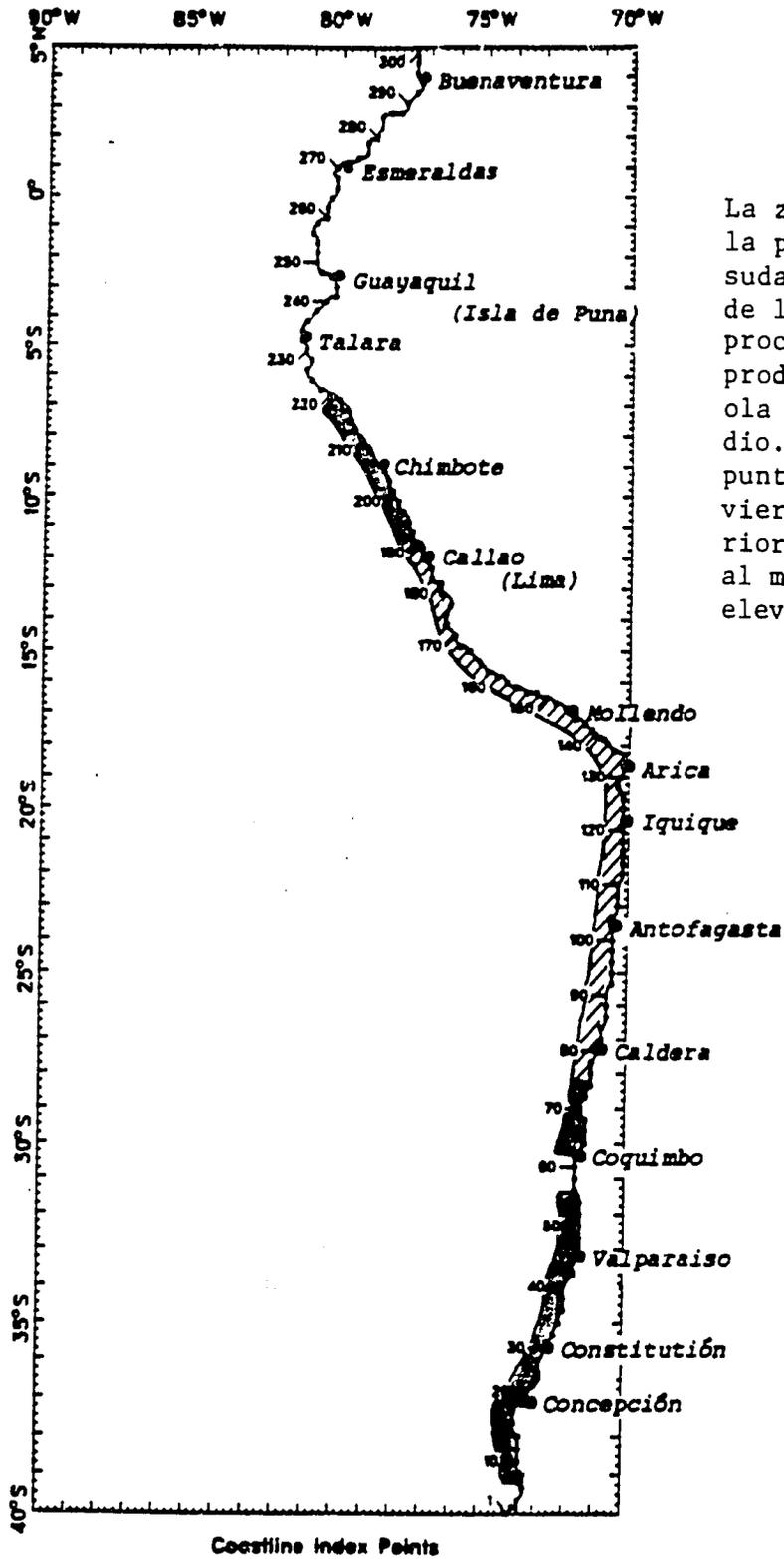


Figura 2.9

La zona de rayas denota la porción de la costa sudamericana a lo largo de la cual el tsunami procedente de la zona E produjo elevaciones de ola superiores al promedio. En las zonas de puntitos, las olas tuvieron una altura inferior al promedio, pero al menos tuvieron una elevación de un metro.

Cuadro 2-2

GAMA APROXIMADA DE ELEVACIONES DE OLA MAXIMAS (EN METROS)
A LO LARGO DE LA COSTA CERCA DE CALLAO (LIMA) Y ARICA

ZONA DE ORIGEN	A	B (NORTE)	B (SUR)	C	D	E
ZONA COSTERA						
CALLAO	2-3m	1-3	1-3	0.25-0.5	0.5-1.5	4-5
ARICA	0.5-0.75	2-4	4-6	0.5-1.5	1-2	8-13

Sección 3

RESULTADOS DEL MODELO - ACUMULACION Y TERMINACION

En la sección precedente se describió la generación de un tsunami por los terremotos postulados y la propagación de las olas del tsunami desde los lugares del terremoto. Las regiones que son susceptibles de peligrar en cada caso se identificaron calculando las alturas de ola (ascendentes) en lugares seleccionados inmediatamente frente a las costas en donde la profundidad del agua descendía a 200 m. En esta sección, se elabora un modelo de las olas en estos puntos seleccionados a medida que se propagan hacia tierra. A medida que la profundidad del agua sigue disminuyendo, las olas continúan haciéndose mayores acumulación. La altura de ola máxima y la pendiente del terreno tierra adentro determinan el grado de inundación producido por las olas (terminación). Se seleccionaron dos lugares para esta aplicación detallada del modelo: Lima, Perú y Arica, Chile. Se seleccionaron estos lugares debido a que el modelo de propagación indicó olas relativamente grandes frente a las costas y porque ambos lugares han sufrido daños extensos debidos a los tsunamis en el pasado. Las dos ciudades se dan como ejemplos. Por supuesto, pudieran realizarse cálculos análogos para cualquier lugar deseado.

3.1 LIMA, PERU

Lima es la ciudad capital del Perú y su mayor ciudad (por orden de magnitud). También es un centro de tráfico ferroviario, vial, aéreo y marítimo. Gran parte del extremo occidental de la ciudad está en el Distrito del Callao, que contiene la mayoría de las instalaciones portuarias (Figura 3.1). El Distrito de La Punta yace al suroeste de Callao en una pequeña península que se extiende al Pacífico. Los distritos de Callao y La Punta están situados en el extremo más bajo de la ciudad que sube generalmente hacia el oriente. La mayor parte de la costa hacia el sur de Callao está bien por encima del nivel del mar, con poca amenaza de inundación. Por tanto, el análisis que sigue se centra en la amenaza para Callao y La Punta.

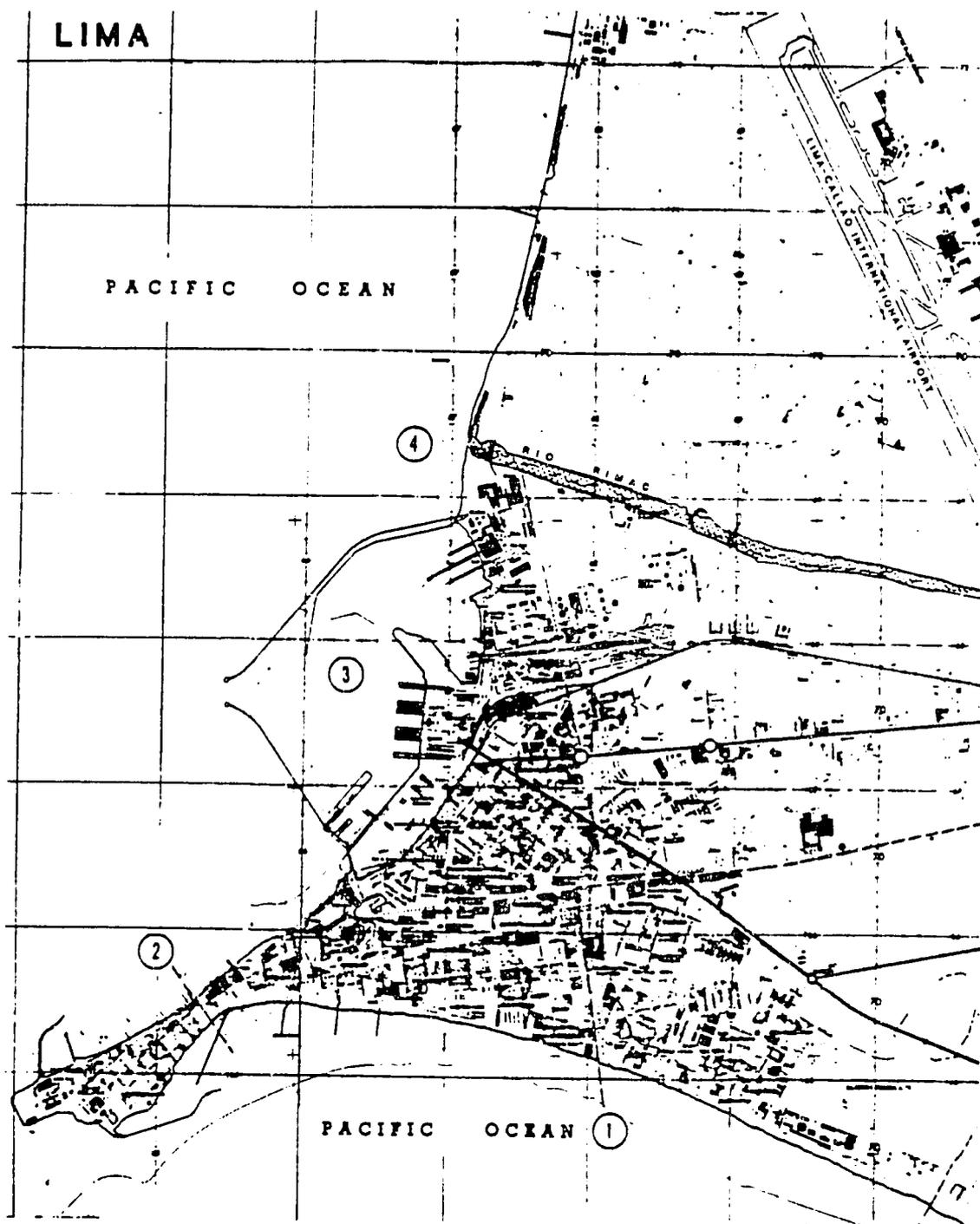


Figura 3.1. Topografía de los Distritos de Callao y La Punta en Lima. La línea de guiones rotulada 1 es la línea divisoria entre los Distritos de Callao y Bellavista. La línea divisoria de La Punta-Callao está identificada con el número 2. La dársena identificada por el número 3 contiene muchas instalaciones marítimas. La desembocadura del río Rimac está identificada por el número 4.

Lima está situada a aproximadamente 12°S, y yace en una planicie relativamente baja que sube hasta los Andes por el este. Esta baja planicie se extiende desde la Hacienda Márquez, a unos 15 km al Noroeste de La Punta, hasta Punta La Chira, a unos 20 km al sureste de La Punta. Arriba y abajo de la costa, las elevaciones del terreno son algo mayores y la costa es más acantilada. Isla San Lorenzo yace al oeste de Callao y ofrece algún resguardo al puerto.

3.1.1 Historia de tsunamis

Lima tiene una larga historia de pérdidas ocasionadas por los tsunamis.* Desde el primer registro de destrucción tsunamigénica en julio de 1586 hasta el presente han perdido la vida en Lima como resultado de los tsunamis unas 5000 personas. Muchas de estas muertes ocurrieron durante el terremoto del 28 de octubre de 1746 y los tsunamis que produjeron grandes daños en Lima y destruyeron Callao. Los eventos tsunamigénicos destructivos pasados alrededor de Lima han seguido un determinado patrón. Los daños y pérdidas personales en Lima se han debido principalmente a los movimientos sísmicos, mientras que en La Punta y Callao se han debido en todo o en parte a los tsunamis. En cada caso en que ocurrió daño por tsunami (Kuroiwa menciona 9 eventos entre 1587 y 1974; Soloviev y Go citan 10), los efectos principales se han dejado sentir en La Punta y Callao.

* La información que sigue se ha derivado de cierto número de fuentes (Berninghausen, 1962; Ida y colaboradores, 1967; Kuroiwa, 1981; Soloviev y Go, 1969). Existen diferencias importantes en sus recuentos de las pérdidas y fechas de los eventos tsunamigénicos. Esta confusión es exacerbada por la dificultad de separar el daño producido por el terremoto y el daño producido por el tsunami durante un evento local. El lector interesado debería consultar las fuentes existentes y sacar sus propias conclusiones.

3.1.2 Simulaciones del riesgo

Las simulaciones del modelo de acumulación y terminación (inundación) se realizaron para los terremotos postulados en las zonas A, B (Norte y Sur) y E. La gama de alturas de olas frente a las costas procedentes de la Zona C fue suficientemente pequeña para que no se considerara esta zona (véase el cuadro 2-3). Los resultados para las pasadas A, B y E indicaron que la mayor parte de la energía de las olas tsunamigénicas se propagaba bien frente a las costas al mar abierto o directamente a la costa. Así, pues, los eventos situados a cierta distancia a lo largo de la costa desde una ciudad en particular tendrían efectos que disminuirían con la distancia a lo largo de la costa. Sobre esta base, tampoco se consideró la zona D con respecto a Lima.

Las figuras 3.2 - 3.5 ilustran las zonas interiores que se verían afectadas por las alturas de ola máximas pronosticadas por el modelo para los cuatro casos. Como pudiera esperarse, la zona E de origen produce el peor efecto, seguida de cerca por la zona de origen A. La inundación pronosticada se extiende por más de un kilómetro tierra adentro en algunos lugares, incluye a Callao y La Punta y se extiende casi por cuatro kilómetros a lo largo de la costa. Los terremotos tsunamigénicos en las zonas de origen B (norte) y B (sur) producen efectos análogos aunque mucho menos severos que los de las zonas E y A. En estos casos, Callao y La Punta sufren el embate mayor de las olas, pero la mayor parte de Lima no es afectada.

De estos resultados del modelo pueden obtenerse algunas interpretaciones bastante simples. Los terremotos grandes que ocurren cerca de Lima (v.g.: casos A y E) tienen mayores posibilidades de producir daños por tsunami en Lima que los terremotos que ocurren más lejos. Podemos suponer que la amenaza de los terremotos más pequeños es algo menor que la de los grandes, aunque esto no siempre tiene que ser así. El factor crítico, que no puede incluirse en el modelo, es la eficiencia relativa de un terremoto real en producir un tsunami. También, podemos llegar a la conclusión de que Callao y La Punta están sujetos a cierto grado de inundación de cualquier tsunami que se origine a lo largo de la costa sudamericana, independientemente de la distancia recorrida.

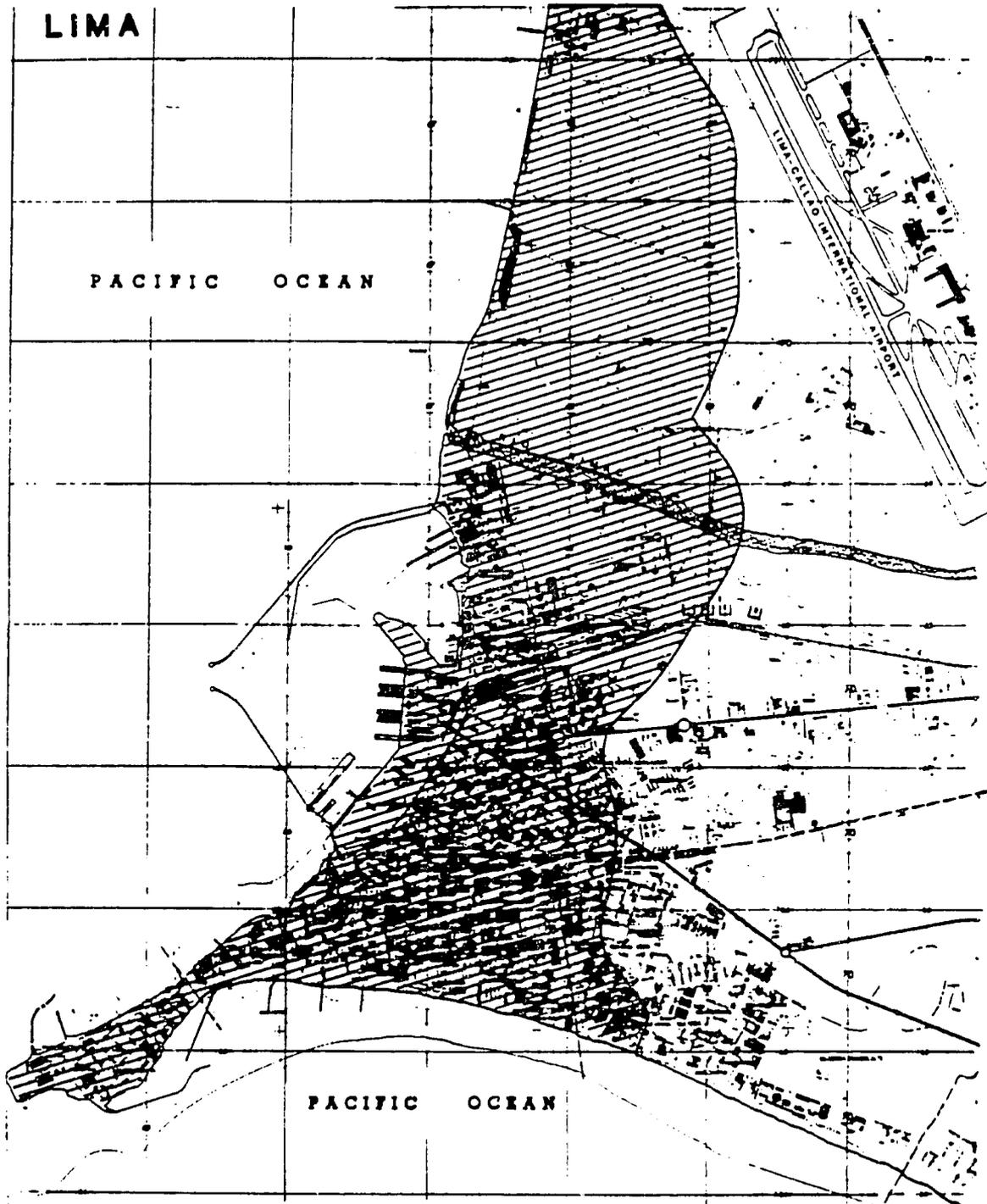


Figura 3.2. El modelo pronostica inundación en la zona de rayas debida al tsunami procedente de la zona E.

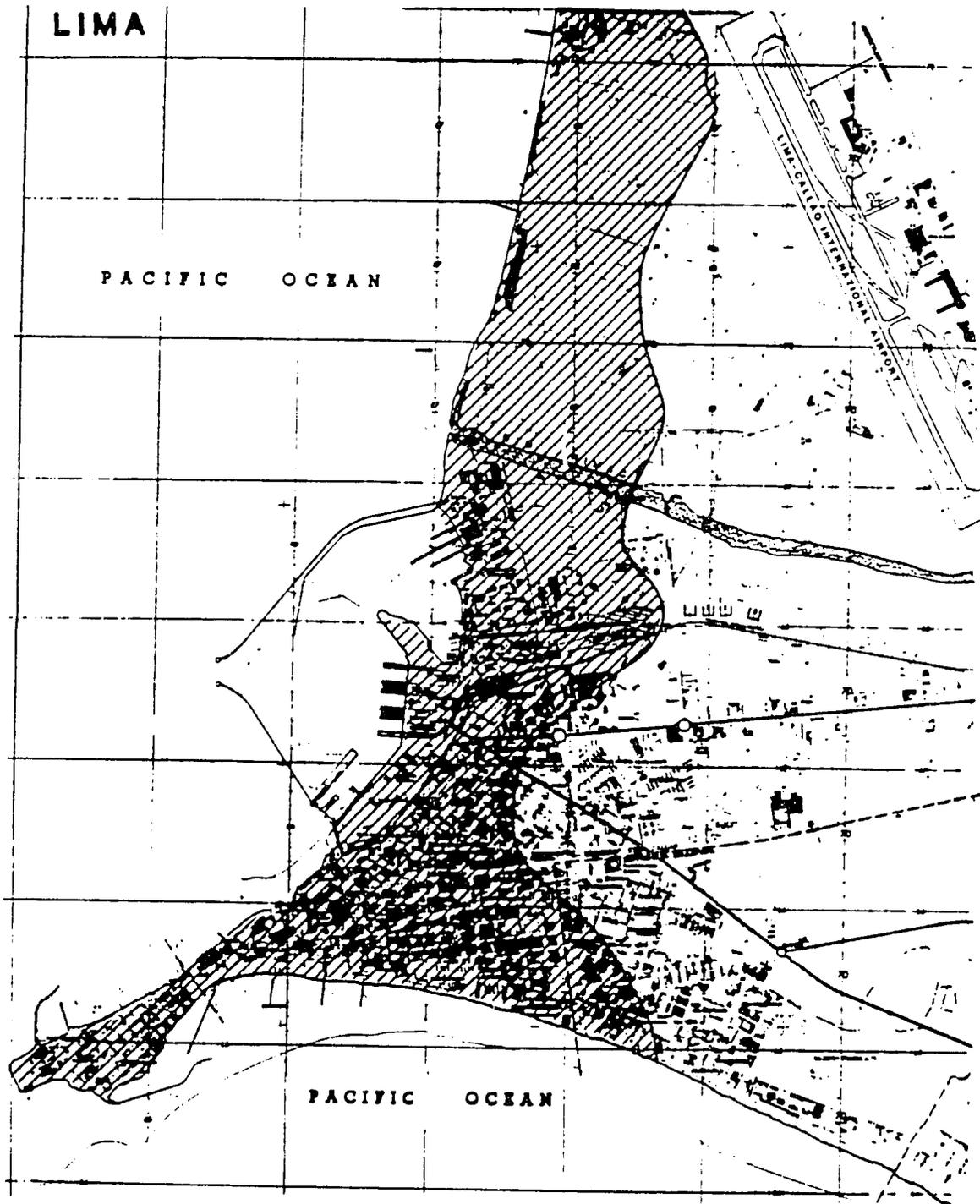


Figura 3.3. El modelo pronostica inundación en la zona de rayas debida al tsunami procedente de la zona A.

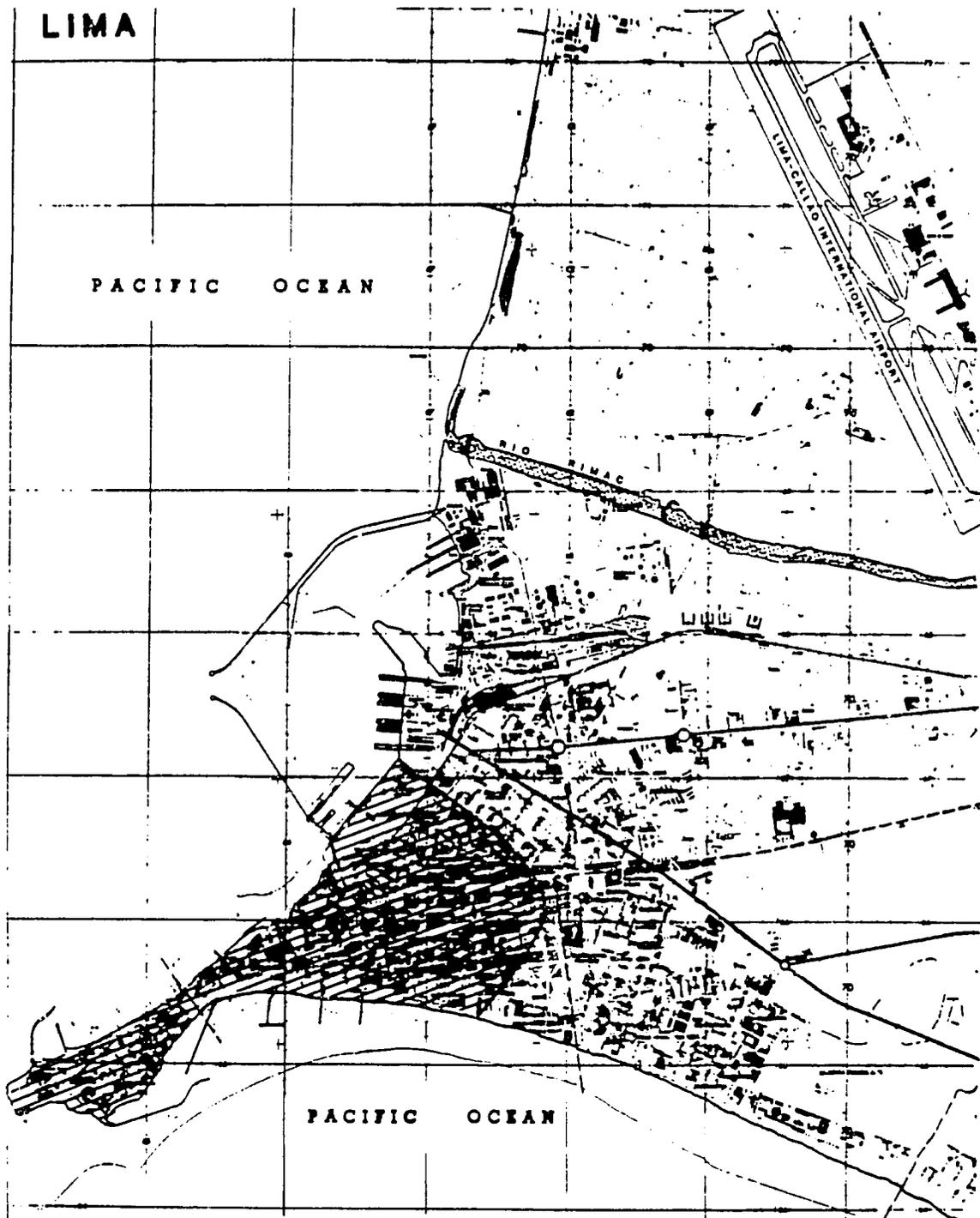


Figura 3.4. El modelo pronostica inundación en la zona de rayas debida al tsunami procedente de la zona B (norte)

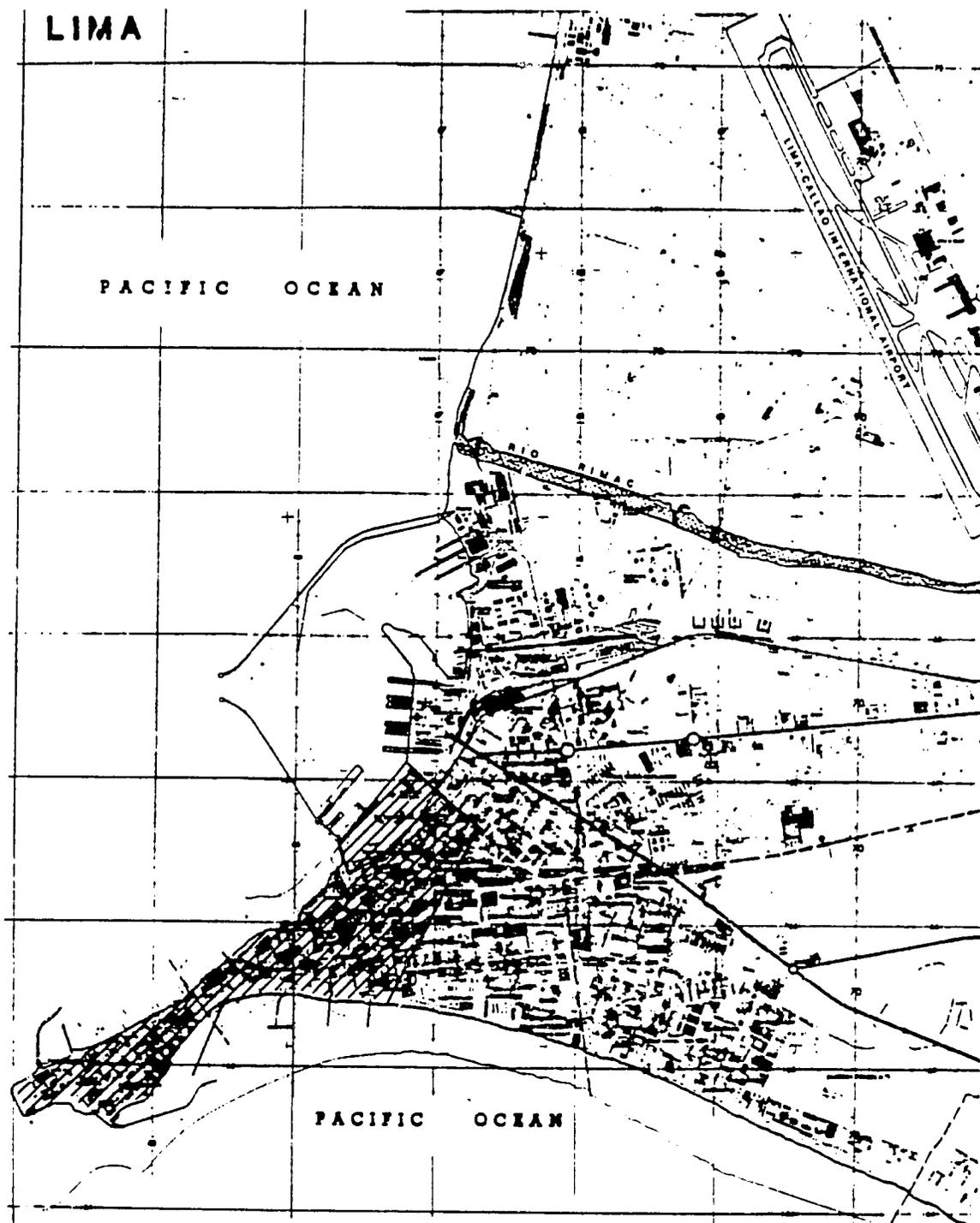


Figura 3.5. El modelo pronostica inundación en la zona de rayas debida al tsunami procedente de la zona B (sur).

Hay que introducir aquí una nota de precaución. Estas simulaciones no pretenden ser representaciones exactas de la realidad, y los resultados no son pronósticos exactos. Son aproximaciones basadas en las características más importantes del fenómeno. La topografía de la tierra se especifica sin referencia al nivel de desarrollo de la zona. Una zona cubierta de calles y edificios altos tendría un patrón de inundación bastante diferente de zonas residenciales o parques. El grado de resolución requerido para incluir estos factores no podría incluirse en este estudio. Además, un estudio de resolución sumamente elevada estaría aún basado en tsunamis hipotéticos. La investigación de resolución más baja realizada aquí proporciona información importante y sirve de útil demostración de los métodos empleados, en tanto que permanece relativamente simple y económica. La conclusión es la de que estos resultados son estimaciones bien informadas de lo que pudiera ocurrir, no pronósticos de lo que ocurrirá. Deberían tomarse en cuenta como guía para la clase y grado de riesgo que presentan los tsunamis.

3.2 ARICA, CHILE

Arica es una pequeña localidad portuaria y pesquera en la región septentrional de Chile, a 20 km de la frontera de Chile-Perú. Yace cerca del centro del giro en la costa del Pacífico de Sudamérica, en el extremo más meridional de la llanura costera baja conocida como la Pampa de la Yarada. La costa al sur de Arica es una línea casi ininterrumpida de acantilados que sube pronunciadamente a planicies elevadas. Esta región de planicies elevadas que se extiende hacia el norte al Perú yace al este de la propia Arica, y forma un muro oriental para la Pampa de la Yarada. La figura 3.6 es un mapa de Arica y los alrededores incluyendo la costa de la Pampa de la Yarada.

Arica propiamente dicha está a varios metros por encima del nivel del mar. El extremo sudoriental de la ciudad está construido en las laderas de varias colinas grandes, la mayor de las cuales, el Morro Gordo, tiene una altura aproximada de 200 m. Dos ríos cruzan la zona: el río San José pasa a través de la localidad, mientras que el río Lluta cruza la llanura al norte de la ciudad.

Arica es uno de los mayores puertos marítimos de la sección septentrional de Chile. Dos vías ferroviarias terminan en Arica, una a Tacna y la otra a Bolivia, y la carretera Panamericana pasa a través de la ciudad. Al menos dos terminales de petróleo aparecen en los mapas de la zona, uno cerca del agua.

3.2.1 Historia de tsunamis

Arica, al igual que Lima, tiene una larga historia de daños producidos por los tsunamis, siendo el evento más antiguo registrado el ocurrido en 1604. Nueve tsunamis, aproximadamente, han asolado la ciudad desde entonces y los niveles de daños han oscilado entre mínimos y una destrucción casi total. El tsunami de agosto de 1868, que ocasionó 200 muertes (Soloviev y Go, 1969) e inundación extensa, transportó al cañonero USS Wateree varios centenares de metros tierra adentro. El registro histórico indica que al menos en otra ocasión un tsunami (o una combinación de terremoto y tsunami) destruyó prácticamente la ciudad. Parece que la ciudad ha sido trasladada de lugar al menos dos veces, principalmente en respuesta a tales eventos destructivos.

3.2.2 Simulaciones del riesgo

Las simulaciones del modelo de acumulación y terminación (inundación) fueron realizadas para los seísmos postulados en las zonas A, B (Norte y Sur) y E. La gama de alturas de las olas frente a las costas desde la zona C fue suficientemente pequeña para no considerar esta zona (véase el cuadro 2-3). Los resultados de las pasadas A, B y E indicaron que la

mayoría de la energía de las olas de tsunami se propagaba bien frente a las costas al mar abierto o directamente a la costa. Por tanto, los eventos ubicados a cierta distancia a lo largo de la costa desde una determinada ciudad tendrían efectos que disminuirían con la distancia a lo largo de la costa. Sobre esta base, la Zona D tampoco se consideró con respecto a Arica.

Las figuras 3.7 - 3.10 ilustran las zonas tierra adentro que serían afectadas por la altura máxima pronosticada por el modelo para los cuatro casos. Como pudiera esperarse, la zona de origen E produce el peor efecto, ocasionando inundación bastante tierra adentro hasta uno o dos kilómetros al noroeste de la ciudad. Poca inundación se observa en la propia ciudad (figura 3.7).

El tsunami procedente de la zona B (Sur) es el que representa la amenaza más intensa siguiente (figura 3.8). Como en el caso E, porciones de la costa cerca de Arica son inundadas, pero las zonas de inundación no se extienden tan lejos tierra adentro. Nuevamente, ocurre poca inundación en la propia Arica.

Los tsunamis que se originan en las zonas al noroeste de Arica [B (Norte) y A] representan una amenaza menor para la ciudad y sus alrededores (figuras 3.9 y 3.10). La amenaza disminuye con la distancia entre la ciudad y la zona de origen, debido al hecho de que gran parte de la energía del tsunami procedente de estas zonas irradia directamente al suroeste al océano profundo, y relativamente poca energía se propaga por largas distancias a lo largo de la plataforma continental.

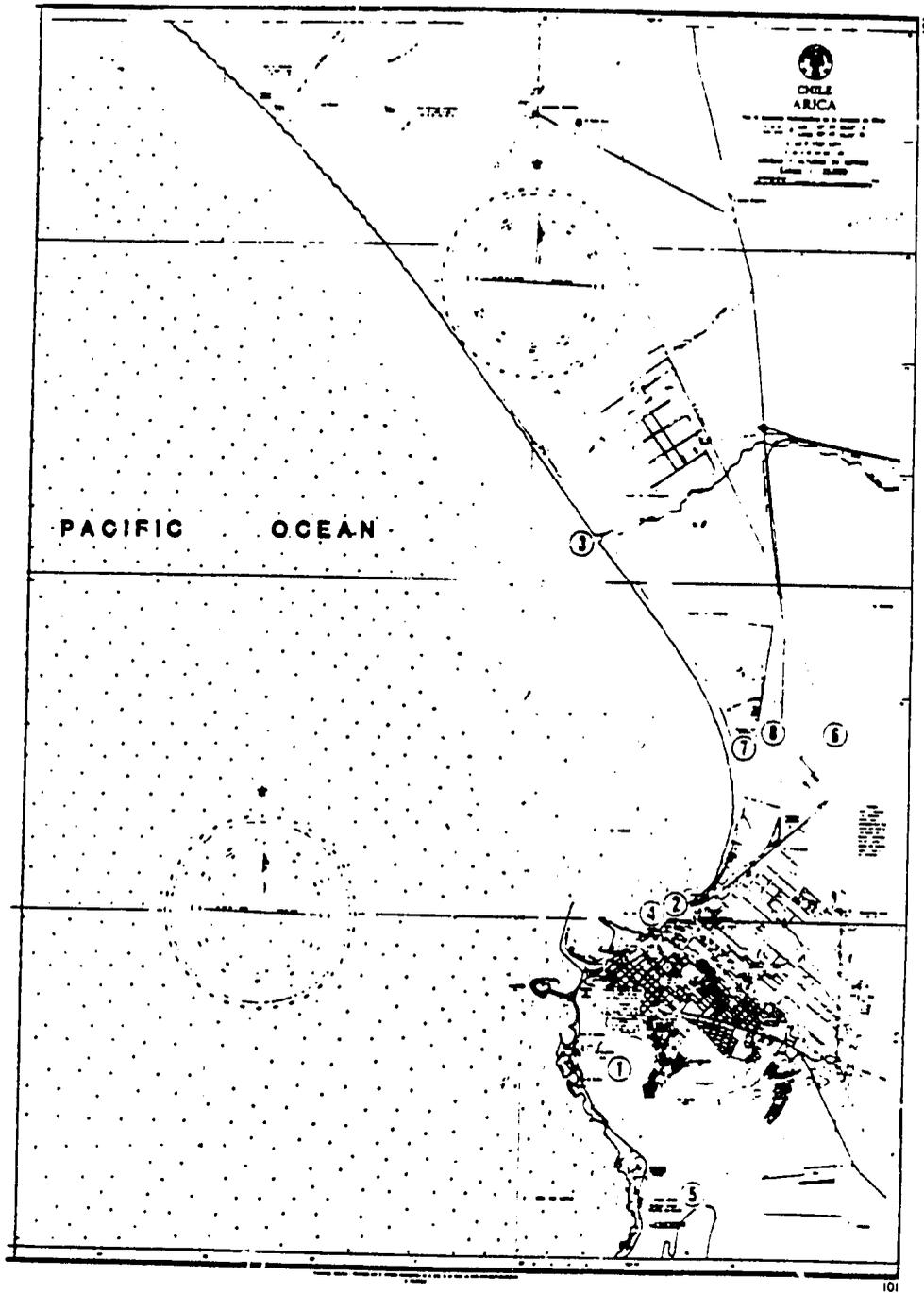


Figura 3.6. Mapa de Arica y vecindad inmediata. El Morro Gordo, el río San José y el río Lluta se denotan por 1, 2 y 3, respectivamente. Dos terminales de petróleo se denotan por 4 y 5. El ferrocarril a Bolivia (6), el ferrocarril a Tacna (7) y la Carretera Panamericana (8) se ilustran también.

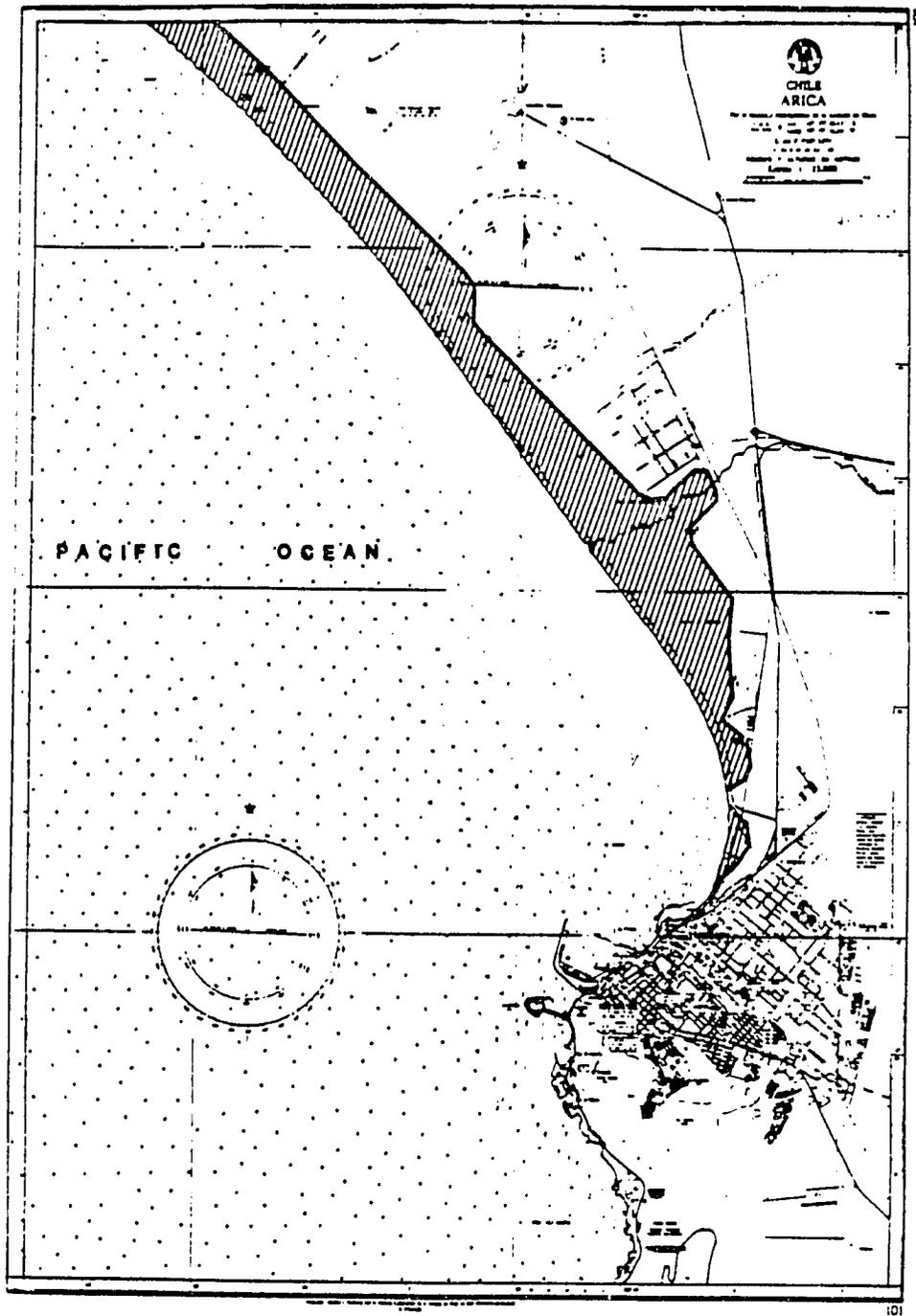


Figura 3.7. El modelo pronostica inundación de la zona de rayas debido al tsunami procedente de la Zona E.

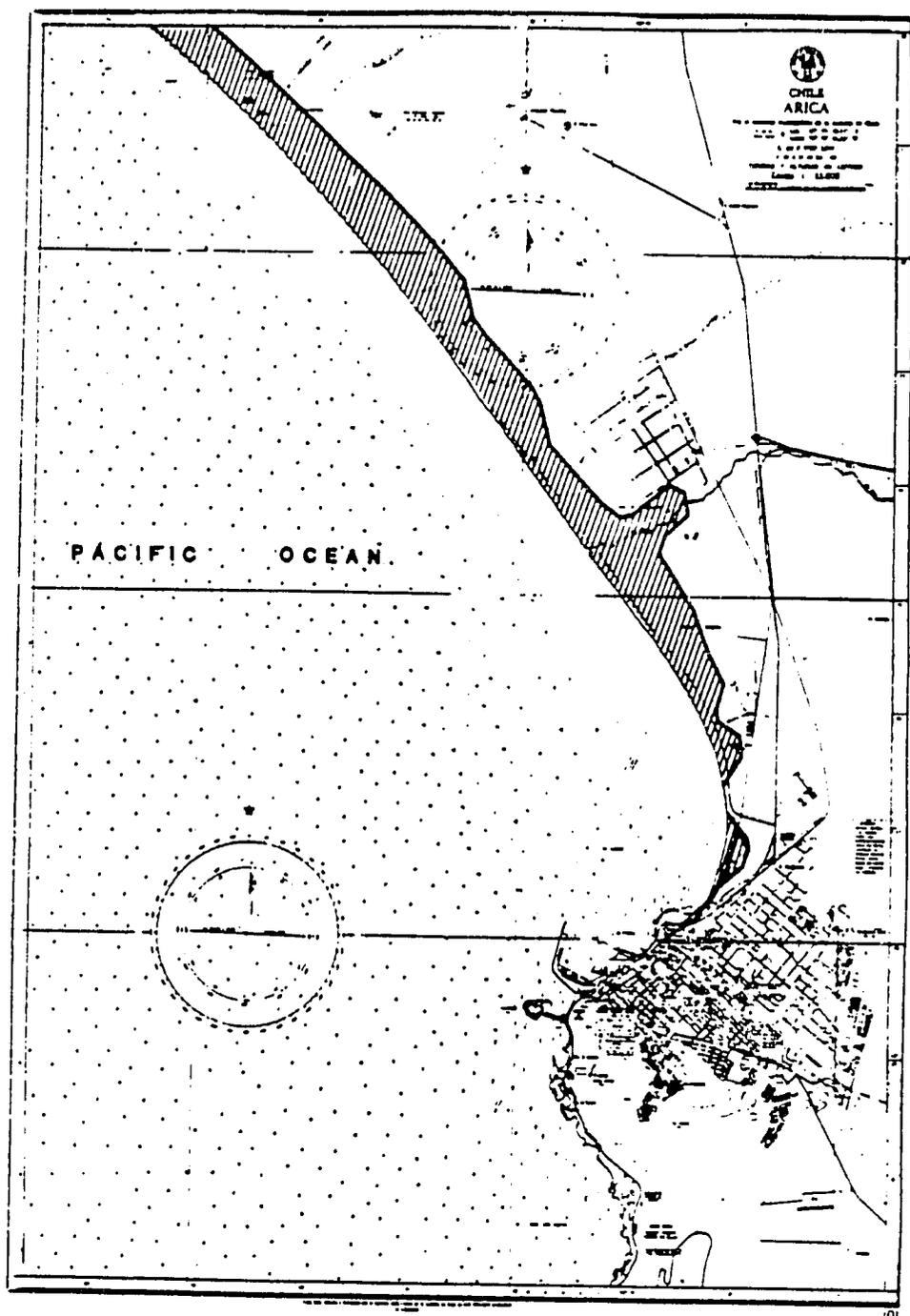


Figura 3.8. El modelo pronostica inundación de la zona de rayas debido al tsunami procedente de la Zona B (Sur).

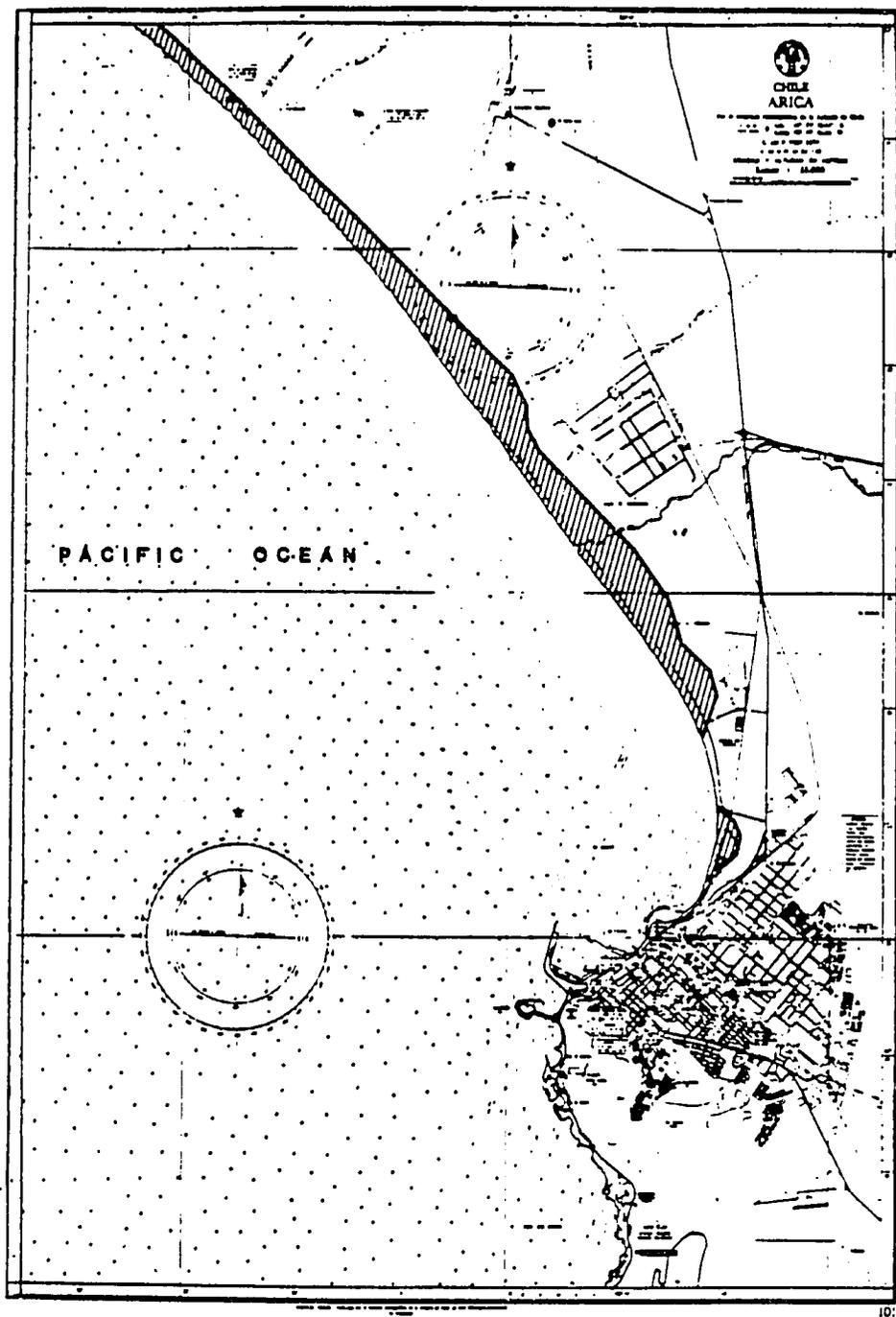


Figura 3.9. El modelo pronostica inundación de la zona de rayas debida al tsunami procedente de la Zona B (Norte).

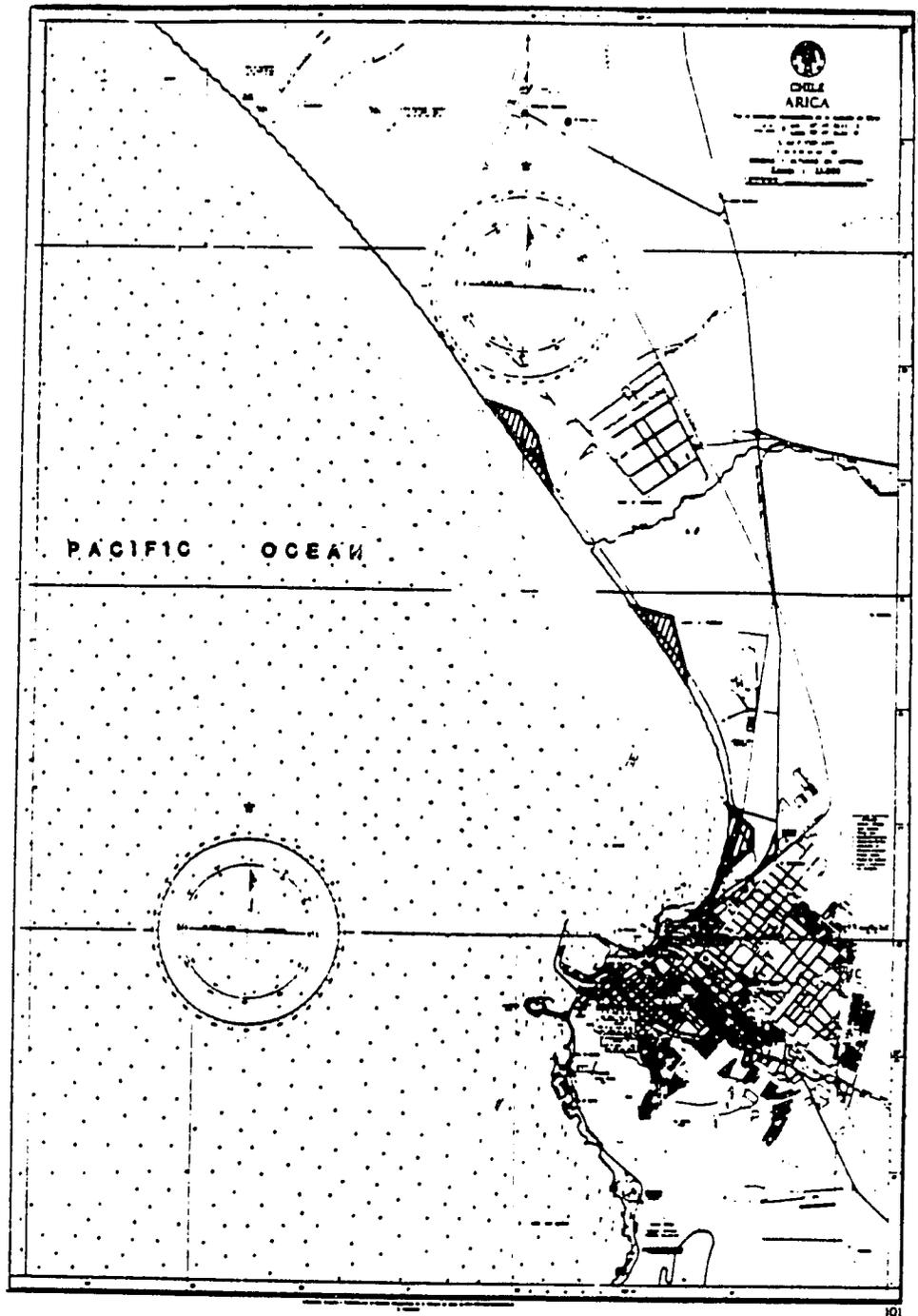


Figura 3.10. El modelo pronostica inundación de la zona de rayas debida al tsunami procedente de la Zona A.

3.3 REPERCUSIONES

Parece que la propia localidad de Arica no está sometida a graves efectos debidos al tsunami generado por terremotos en la región de la fosa de Perú-Chile. Sin embargo, la llanura septentrional está expuesta y es vulnerable a la inundación. En la actualidad, la construcción a lo largo de la costa parece limitada, pero si se produce una construcción más intensa en esta zona será necesario tener presente el riesgo tsunamigénico.

Una mayor consideración de estos resultados indica que, si bien la mayor parte de la localidad parece segura, la zona inmediata al agua quizás esté amenazada por un tsunami intenso procedente de las zonas E y B (Sur). Estas simulaciones produjeron olas de 4-6 m en Isla Alacrán y el punto que se extiende hacia el mar inmediatamente al norte de ella (llamado en algunos mapas Rada de Arica). Es probable que en esta zona salte el agua y se produzca inundación. No hay duda de que ocurrirían grandes daños a los buques sorprendidos junto a tierra por un tsunami importante.

Sección 4

APLICACIONES A LA PLANIFICACION PARA CASOS DE DESASTRE

4.1 RESULTADOS Y APLICACIONES DEL MODELO

El objetivo primordial de este estudio a base de modelos consistió en demostrar una técnica para obtener una comprensión de los procesos que producen desastres tsunamigénicos. Los resultados de este estudio pueden desempeñar un papel central en la formulación de planes y medidas de política eficaces destinadas a reducir los efectos económicos y sociales de un futuro tsunami.

Los dos casos considerados aquí presentan situaciones diferentes. En el caso de Lima, una porción sustancial de las zonas costeras muy construidas de la ciudad es susceptible de ser vulnerable al tsunami generado en cualquiera de las cuatro zonas del modelo. Se pronostica una fuerte inundación cuando ocurren seísmos en las zonas E y A. En todos los cuatro casos, la ciudad portuaria de Callao es vulnerable a pérdidas por inundación. En el caso de Arica, las zonas portuarias son vulnerables al tsunami generado en las zonas E y B (Sur) y en cierto grado en la zona B (Norte). Sin embargo, la mayor parte de la inundación pronosticada ocurre en las llanuras no construidas al norte de la ciudad. Las zonas pobladas parecen no sufrir una amenaza relativamente importante.

La diferencia en el grado de la amenaza sugiere la necesidad de enfoques diferentes para planificar las medidas encaminadas a paliar los efectos de los tsunamis. Por ejemplo, la planificación en Lima debería concentrarse quizás en sistemas de aviso, educación de la población para responder a los avisos y (a largo plazo) posible construcción de medios para absorber la energía de las olas antes de que llegue a la costa (por ejemplo, rompeolas). Para Arica, debería hacerse quizás hincapié en una planificación de largo plazo que oriente la construcción futura que se realice en las zonas de la planicie costera.

El esfuerzo necesario para reducir el riesgo de los tsunamis requiere planificación de corto y largo alcance. Las técnicas hidrodinámicas/numéricas ilustradas en este estudio pueden resultar bastante valiosas para realizar el proceso de planificación. Pueden citarse en particular cuatro campos de aplicación:

- Evaluaciones integrales del riesgo, para definir la naturaleza de la amenaza.
- Análisis de mitigación, para examinar formas de reducir la amenaza.
- Sistemas de aviso en tiempo real, para aumentar la probabilidad de supervivencia una vez que surja la amenaza. Y
- Planificación de las respuestas a casos de desastre, para establecer procedimientos para hacer frente a la amenaza.

Examinaremos estos campos uno por uno.

4.2 EVALUACIONES INTEGRALES DEL RIESGO

El primer paso para hacer frente a la amenaza consiste en estimar su probabilidad y magnitud. Un estudio como el presente, junto con un detenido análisis de la experiencia, puede ayudar a familiarizar a las autoridades municipales y de control de los desastres con la urgencia del problema. Tal como ha demostrado este estudio, las simulaciones pueden servir para separar zonas muy amenazadas de las que están relativamente libres de riesgo. Un detenido análisis de la amenaza para comunidades y regiones específicas puede ayudar a establecer prioridades para distintas formas de abordar el problema. Puede bastar, por ejemplo, fomentar el crecimiento de densa vegetación que sirva de barrera disipadora de la energía entre el mar y las zonas residenciales. O pueden requerirse mejoras estructurales en las estructuras costeras. Lo cierto es que las simulaciones pueden desempeñar un papel clave en eliminar una actitud fortuita y pasiva proporcionando una base de información práctica para la planificación.

4.3 ANALISIS DE MITIGACION

Una vez que se ha establecido la naturaleza de la amenaza y se ha decidido el enfoque general para mitigarla, los modelos pueden proporcionar un medio confiable y económico de evaluar muchos procedimientos seleccionados antes de emprender proyectos de construcción costosos. Si, por ejemplo, parece que se requiere construir un rompeolas, mediante simulaciones numéricas se puede evaluar la eficacia de configuraciones y orientaciones posibles de las estructuras de protección. También pueden utilizarse para examinar las formas en las que dichas estructuras modificarían los patrones de flujo ordinarios en la zona protegida. Naturalmente, este aspecto es especialmente importante en las localidades muy dependientes de industrias relacionadas con el mar. Debido a que los modelos tales como el SURGE II también pueden simular la inundación producida por los tsunamis, pueden utilizarse para evaluar el uso de defensas en la costa tales como parapetos y muros de retención.

La flexibilidad de las técnicas de modelos las convierte en herramientas ideales para examinar y someter a prueba un amplio abanico de planes de protección contra los tsunamis antes de que una comunidad se comprometa a dedicar recursos valiosos a una determinada actividad. De esta forma, los gobiernos pueden trabajar para aumentar al máximo la eficacia de los fondos generalmente limitados de que disponen para actividades de mitigación. Los modelos pueden ser especialmente útiles en los análisis de costos y beneficios.

El riesgo tsunamigénico en Arica ilustra el uso adicional de las simulaciones más allá de sus aplicaciones al análisis de las medidas físicas de mitigación de desastres. En este caso, las zonas muy pobladas están en tierras altas y no se ven amenazadas inmediatamente por ninguno de los tsunamis considerados en este informe, aunque pasadas adicionales para otras zonas de origen pudieran modificar esta conclusión. Sin embargo, grandes zonas costeras en las proximidades se ven potencialmente amenazadas, y esta amenaza ha de ser una consideración importante en toda futura expansión proyectada a estas zonas. Los resultados del modelo pueden utilizarse

directamente en la planificación de dicha construcción y deberían formar parte integral de esas actividades de planificación. Pudiera optarse por evitar la construcción en las zonas de riesgo elevado, evaluar el costo de la construcción y ocupación frente a la probabilidad y grado probable de daño o incluir medidas de control de las inundaciones en los diseños de construcción.

4.4 SISTEMAS DE AVISO EN TIEMPO REAL

Incluso las obras de defensa más cuidadosamente construidas pueden resultar inadecuadas en ocasiones. Sigue existiendo la necesidad de sistemas cuidadosamente planificados para avisar a las poblaciones amenazadas a tiempo para que puedan adoptar alguna acción para protegerse. Aquí nuevamente las simulaciones pueden desempeñar un papel vital.

Los actuales sistemas de aviso de tsunamis utilizan datos de registros sísmicos y registros de altura de mareas para indicar un evento. Esta información se transmite a un centro de aviso donde es analizada y desde donde se retransmiten avisos apropiados. Estos sistemas, que son eficaces cuando la población amenazada está a larga distancia de la zona de origen (al menos una hora de viaje), son esencialmente incapaces de proporcionar aviso adecuado a poblaciones próximas a la zona de origen. Esto sucede en especial en eventos especialmente localizados tales como el reciente tsunami ocurrido en Akita, Japón. En la actualidad, la tecnología disponible brinda la posibilidad de realizar una mejora notable en el tiempo de reacción para los sistemas regionales de aviso y tales sistemas están ahora en las etapas de diseño y desarrollo. El modelo de tsunami descrito en el presente informe forma una parte integral de ese sistema.

Un aspecto importante es el de que si se dispusiera de una evaluación integral del riesgo para una región, entonces la determinación del lugar y la magnitud del terremoto podría convertirse rápidamente a una

identificación tanto de la naturaleza del riesgo como de sus posibles efectos. En vista de las buenas redes de sensores sísmicos y comunicaciones por satélite disponibles, esta determinación puede efectuarse casi instantáneamente. La identificación del riesgo puede utilizarse para generar pronto el aviso que se juzgue apropiado.

Los modelos pueden proporcionar una guía útil para adaptar dichos sistemas de aviso a necesidades locales específicas. Debido a que las zonas de riesgo elevado pueden identificarse con anterioridad a una crisis, pueden prepararse procedimientos apropiados para establecer prioridades de aviso, autoprotección y evacuación. Los resultados del modelo también pueden utilizarse en programas docentes destinados a promover respuestas individuales eficaces durante una emergencia producida por un tsunami.

4.5 PLANIFICACION DE LAS RESPUESTAS EN CASOS DE DESASTRE

Una vez que se ha emitido un aviso de tsunami para una localidad, el hincapié comienza a desviarse de la planificación a la reducción del daño y a la planificación de las medidas para paliar el efecto sobre la comunidad una vez que llegan las olas. Es aquí, en el proceso de planificación de la forma de hacer frente al tsunami, donde las técnicas empleadas en este estudio quizás pudieran tener su mayor influencia, ya que es posible adaptar las simulaciones a las necesidades específicas de los organismos de control de los desastres y ayuda.

Por ejemplo, simulaciones minuciosas pueden indicar qué secciones de las ciudades son susceptibles de ser inundadas o aisladas por la inundación. El uso de vías de evacuación puede analizarse para determinar por cuánto tiempo permanecerían transitables antes de que las cierren las aguas de la inundación. Y puede examinarse la capacidad de los distintos servicios vitales, tales como las líneas de electricidad, gas y comunicaciones, hospitales y servicios de rescate y bomberos, etc., para continuar funcionando durante el desastre y después del desastre.

Dicha información puede emplearse en cierto número de formas. La más evidente es para fines de planificación para casos de emergencia. Pero también puede resultar útil en la planificación y realización de ejercicios de prueba y en la formación del personal de control de desastres y del público en general. Una base de datos minuciosamente documentada de los efectos de tsunamis simulados y observados también pudiera utilizarse en un sistema de respuesta en tiempo real que oriente a las autoridades en su toma de decisiones. Todos estos usos son técnicamente fáciles de poner en práctica, aunque pocos han sido aplicados hasta la fecha en los países amenazados por los tsunamis.

4.6 TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA

Este estudio ha ilustrado los usos posibles de las técnicas de modelos para evaluar el riesgo de los tsunamis en lugares específicos y medidas para reducir el riesgo. Las técnicas utilizadas en este estudio han sido elaboradas con anterioridad al estudio. La única labor de desarrollo requerida para este estudio fue la integración de varias técnicas en un enfoque sistemático para dar solución al problema. Lo que esto significa es que la transferencia de esta tecnología directamente a un país interesado pudiera realizarse con relativa facilidad.

La transferencia de tecnología pudiera efectuarse al menos en dos formas. Los científicos estadounidenses pudieran pasar el modelo y proporcionar los resultados, dependiendo de la disponibilidad de fondos, o la región (o ciudad) pudiera adquirir la capacidad de elaboración de modelos de los Estados Unidos y realizar ella misma el análisis. La transferencia de la tecnología pudiera realizarse en etapas que incluirían la adquisición del equipo de computadoras por la región local, la capacitación de los científicos locales en la operación del equipo y la transferencia de los programas para pasar e interpretar los modelos de tsunami.

Es evidente que las técnicas de modelos pueden proporcionar una información valiosa para la planificación de los riesgos de los tsunamis. Más fundamentalmente, empero, dichas técnicas pueden proporcionar al planificador tiempo, tiempo para evaluar la situación en una atmósfera libre de crisis, tiempo para evaluar atentamente las decisiones y tiempo para someter a prueba las opciones disponibles. La experiencia ha demostrado que existe la tendencia entre la gente a mostrarse satisfechos frente a los riesgos naturales en los periodos entre desastres. Las técnicas de simulación pueden ser una herramienta valiosa que puede ayudar a los planificadores y órganos de decisión a reducir al mínimo esa satisfacción y a mantener programas responsables para mitigar las pérdidas económicas y sufrimientos humanos de tsunamis futuros.

REFERENCIAS

- Berninghausen, W.H., 1962: Tsunamis reported from the west coast of South America. Bull., Seismolog. Soc. America, 52, 915-921.
- Iida, K., D.C. Cox y G. Pararas-Carayannis, 1967: Preliminary catalog of tsunamis occurring in the Pacific Ocean. Hawaii Inst. of Geophys. Informe HIG-67-10, Univ. de Hawai, Honolulu.
- Kuroiwa, J., 1981: Historical summary of tsunamis which have affected the central coast of Peru. Manuscrito inédito (Original en español), Lima, Perú.
- Soloviev, S.L. y Ch. N.Go, 1969: Catalog of tsunamis in the Pacific (main data). Academia de Ciencias, Moscú, URSS.