

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CARTOGRAFÍA DE VULNERABILIDAD POR FRAGILIDAD FRENTE A SEÍSMOS EN LA CIUDAD DE HUARAL (PERÚ)

Silvia Vázquez Catalán

Directora: María Teresa Echeverría Arnedo

Codirector: Hernando Tavera Huarache

Máster Universitario en

**Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del
territorio: sistemas de información geográfica y teledetección**

Diciembre de 2016



Universidad
Zaragoza

**Departamento de Geografía y
Ordenación del Territorio**



Resumen

El presente trabajo se centra en valorar la vulnerabilidad de las viviendas del área central de la ciudad de Huaral (Perú), considerando una serie de características especialmente relevantes para determinar la fragilidad de las construcciones en caso de seísmo. La generación de una completa base de datos que recoja dichas propiedades de las viviendas mediante los datos catastrales, la actualización mediante Google Street View y el trabajo de campo, así como una ponderación de las mismas mediante un proceso analítico jerárquico (AHP), permite crear una cartografía que plasma el grado de vulnerabilidad por fragilidad de los lotes catastrales evaluados.

Palabras Clave: *Seísmo, Vulnerabilidad, Perú, AHP, Google Street View, SIG, Cartografía.*

Abstract

This work focuses on assessing the vulnerability of households in the central area of the city of Huaral (Peru), considering a number of particularly relevant characteristics to determine the fragility of buildings in case of earthquake. Generating a comprehensive database that collects those properties of housing by cadastral data, and updating via Google Street View and fieldwork as well as a weighting them by an analytic hierarchy process (AHP), we create a map that captures the degree of vulnerability fragility of the assessed land registry lots.

Key Words: *Earthquake, Vulnerability, Peru, APH, Google Street View, GIS, Cartography.*

ÍNDICE GENERAL

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO.....	3
3.- ANTECEDENTES.....	3
4.- OBJETIVOS.....	5
5.- ÁREA DE ESTUDIO.....	6
6.- METODOLOGÍA.....	7
6.1.- Generación de la base de datos.....	8
6.1.1.- Unificación de lotes catastrales.....	8
6.1.2.- Generación de la geocodificación de los lotes.....	10
6.1.3.- Vinculación de los datos.....	11
6.2.- Verificación de los datos y actualización.....	12
6.3.- Cálculo de la vulnerabilidad.....	14
6.3.1.- Definición de vulnerabilidad y caracterización de los componentes evaluados....	15
6.3.2.- Ponderación mediante AHP.....	20
6.3.3.- Cálculo del grado de vulnerabilidad.....	29
7.- RESULTADOS.....	30
7.1.- Material predominante.....	30
7.2.- Estado de conservación.....	34
7.3.- Número de pisos.....	37
7.4.- Antigüedad.....	39
7.5.- Pendiente.....	41
7.6.- Grado de vulnerabilidad.....	43
8.- RECOMENDACIONES.....	46
9.- DISCUSIÓN.....	46
10.- CONCLUSIONES.....	48
11.- BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXO Tablas del AHP para las características de las viviendas.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa sísmico del Perú.....	1
Figura 2: Mapa de zonificación sísmica-geotécnica para la ciudad de Huaral.....	4
Figura 3: Área de estudio en el cuadrante noreste de la ciudad de Huaral.....	6
Figura 4: Diagrama del proceso metodológico.....	8
Figura 5: Ejemplo de los datos sin unificar.....	9
Figura 6: Ejemplo de datos catastrales unificados.....	9
Figura 7: Leyendas de codificación de los valores considerados para cada parámetro.....	10
Figura 8: Diagrama del flujo de trabajo para las generación de la geocodificación de los lotes.....	11
Figura 9: Componentes del riesgo y de la vulnerabilidad, según CENEPRED.....	15
Figura 10: Relación promedio de daño en los tipos de materiales de construcción.....	18
Figura 11: Diagrama del flujo del Proceso Analítico Jerárquico.....	21
Figura 12: Predominancia de materiales en las construcciones.....	30
Figura 13: Mapa de material predominante en las edificaciones.....	32
Figura 14: Estado de conservación de las edificaciones.....	34
Figura 15: Mapa sobre el estado de conservación de los edificios.....	36
Figura 16: Distribución de la elevación de los edificios por número de pisos.....	37
Figura 17: Mapa según la altura de las edificaciones.....	38
Figura 18: Distribución de la antigüedad de las construcciones.....	39
Figura 19: Mapa en función de la antigüedad de los lotes.....	40
Figura 20: Mapa de pendientes para el área urbana de la ciudad de Huaral y su entorno.....	41
Figura 21: Distribución del grado de vulnerabilidad por lotes.....	43
Figura 22: Mapa final de vulnerabilidad de las construcciones.....	45

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1: "Muro de la vergüenza".....	2
Imagen 2: Vista lateral (izquierda) y vista de la fachada de la vivienda (derecha).....	12
Imagen 3: Cambios experimentados por una vivienda entre 2010 (izquierda) y 2014 (derecha)...	13
Imagen 4: Vista de los callejones de ascenso al cerro de San Cristóbal.....	14
Imagen 5: Asentamiento urbano en el entorno metropolitano de Lima.....	16

Imagen 6: Construcción de adobe con grietas.....	31
Imagen 7: Construcción de ladrillo afectada por humedad basal.....	33
Imagen 8: Construcción de estera (izquierda) y construcción de madera y bambú (derecha).....	34
Imagen 9: Construcción en un estado de conservación malo.....	35
Imagen 10: Construcción habitada en ruinas en el cerro de San Cristóbal.....	35
Imagen 11: Vista general del cerro de San Cristóbal.....	42
Imagen 12: Construcciones asentadas sobre una pendiente de en torno al 35°.....	42

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Información de partida del estudio.....	8
Tabla 2: Escala de valoración propuesta por T. Saaty.....	22
Tabla 3: Matriz de vulnerabilidad.....	25
Tabla 4: Matriz de normalización.....	25
Tabla 5: Vector de priorización y peso ponderado.....	25
Tabla 6: Vector de suma ponderado.....	26
Tabla 7: Suma total de vectores de suma ponderada y su división por el vector de priorización....	26
Tabla 8: Valores de ponderación obtenidos para las características de las viviendas.....	27
Tabla 9: Valores establecidos por CENEPRED para las características de las viviendas.....	27
Tabla 10: Valores de ponderación obtenidos para los materiales de construcción.....	28
Tabla 11: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para los materiales.....	28
Tabla 12: Valores de ponderación obtenidos para los estados de conservación.....	28
Tabla 13: Valores establecidos por CENEPRED para los estados de conservación.....	28
Tabla 14: Valores de ponderación obtenidos para el número de pisos.....	28
Tabla 15: Valores establecidos por CENEPRED para el número de pisos.....	28
Tabla 16: Valores de ponderación obtenidos para el grado de pendiente.....	28
Tabla 17: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para el grado de pendiente.....	28
Tabla 18: Valores de ponderación obtenidos para el nivel de antigüedad.....	29
Tabla 19: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para el nivel de antigüedad.....	29
Tabla 20: Valores de ponderación finales para definir umbrales de fragilidad.....	29

1.- INTRODUCCIÓN

La historia sísmica de Perú ha mostrado que su borde occidental presenta un alto índice de ocurrencia de eventos sísmicos (Figura 1) y que de acuerdo a su magnitud, muchos de ellos han producido daños importantes en ciudades y localidades distribuidas cerca de la zona costera. La ocurrencia de efectos secundarios como asentamientos, licuefacción de suelos, deslizamientos, caídas de roca y tsunamis propiciaron el incremento de pérdidas humanas y materiales en el área epicentral (Tavera, 2014).

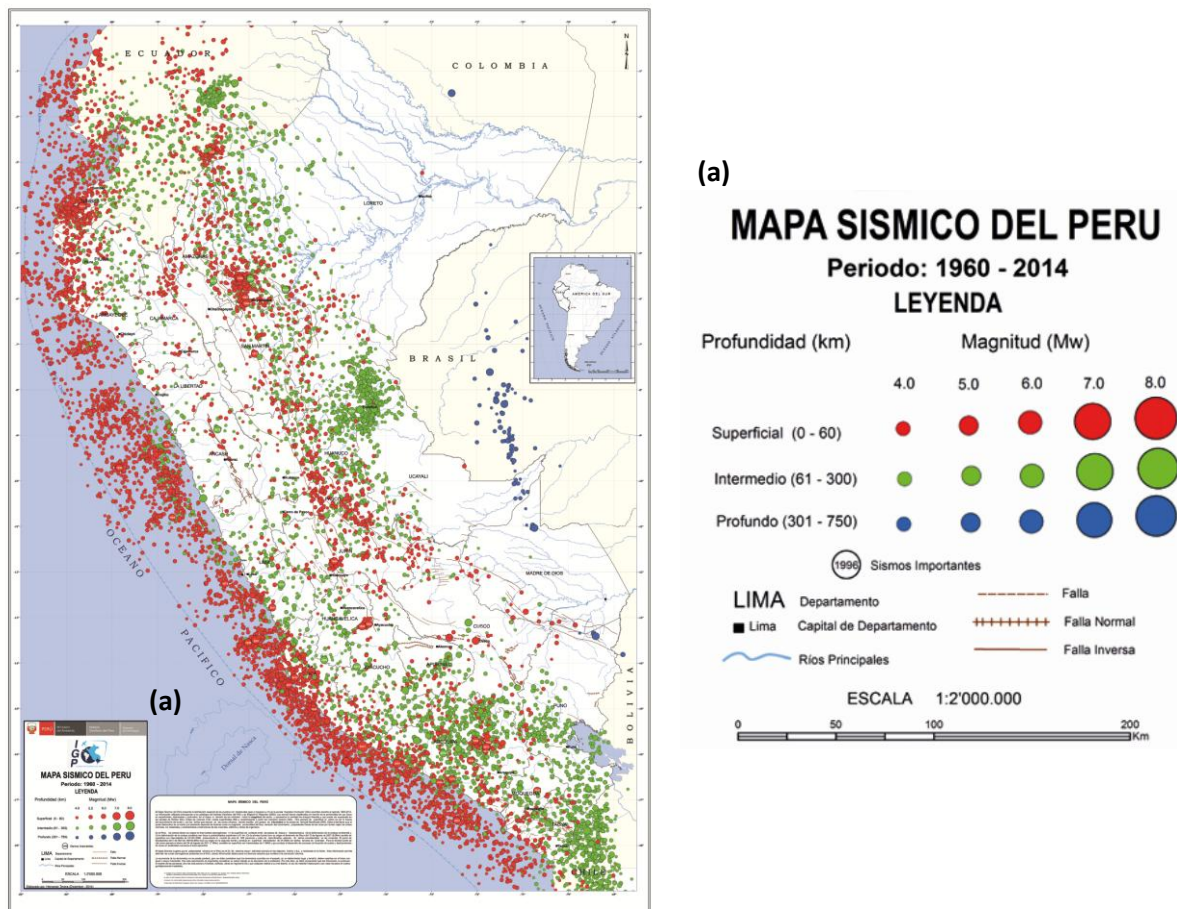


Figura 1: Mapa sísmico del Perú. Fuente: IGP.

El alto riesgo de la zona costera de Perú se ha incrementado desde los años 80 debido a que muchas de las ciudades y/o localidades han soportado procesos continuos de migración de población proveniente del interior del país y, ante la falta de una adecuada planificación urbana y de políticas de planeamiento, los inmigrantes han ocupado zonas de riesgo ante la ocurrencia de peligros naturales. A estos escenarios se suma el hecho de que las viviendas fueron construidas de manera inadecuada, sin seguir criterios de ordenamiento territorial y mucho menos respetando la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente. Es común ver en algunas ciudades cómo las viviendas se asientan en laderas de cerros (Imagen 1), ríos, cauces de barrancos secos y zonas de terrazas inundables sin tener en cuenta su vulnerabilidad.

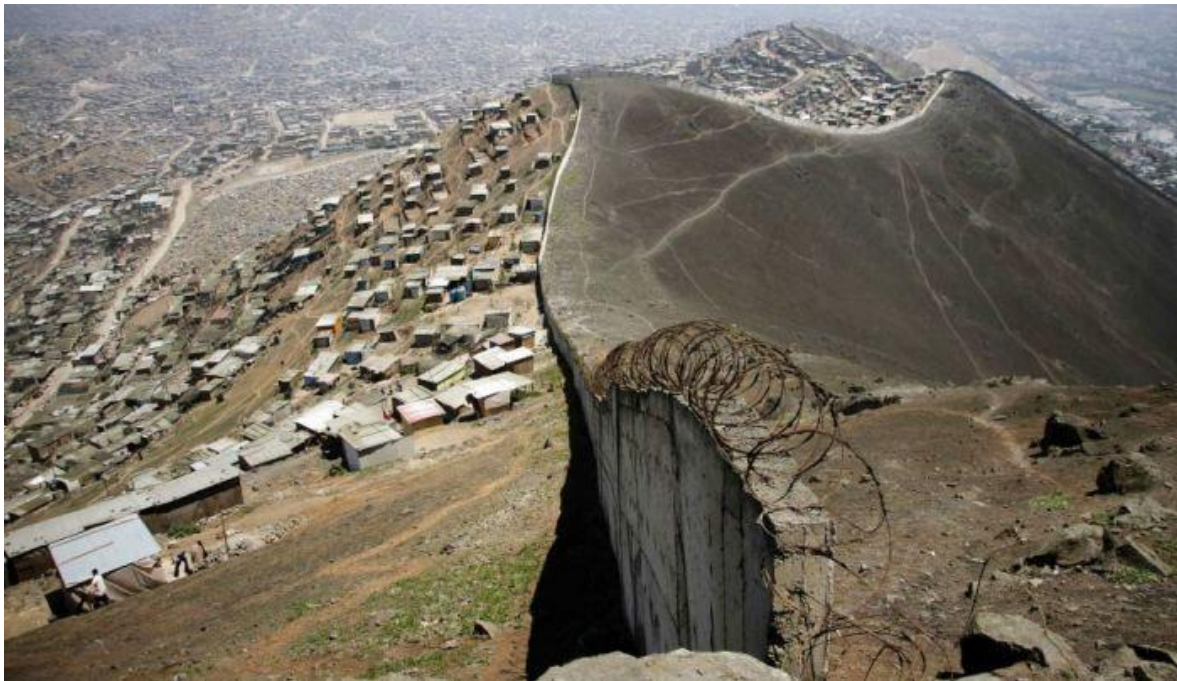


Imagen 1: "Muro de la vergüenza" que separa el rico barrio de las Casuarinas y los asentamientos chabolistas de Pamplona Alta, Lima. Fuente: www.lareplica.es

Considerando que uno de los causantes directos de los daños que producen los seísmos en las ciudades es la calidad de los sustratos sobre los cuales se encuentran las viviendas, en el año 2005 la Asociación Peruana de Empresas de Seguros (APESEG) y el Centro de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID) realizaron un importante aporte para la mejora de la Gestión de Riesgos de Lima Metropolitana con el Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico. A partir de entonces el Instituto Geofísico de Perú realiza estudios similares de Zonificación sísmico-geotécnica para la categorización de los sustratos y la evaluación del nivel de peligrosidad, en tanto que los efectos que produce cada tipo de suelo sobre la propagación y amplitud de las ondas sísmicas permiten tipificar los suelos y estimar su comportamiento dinámico (Tavera, 2015). Sin embargo, con posterioridad a esos estudios es de marcada importancia la realización de trabajos que estimen la vulnerabilidad de las personas y construcciones que se asientan sobre ellos.

El gobierno de la República de Perú está avanzando en legislación de gestión del riesgo de desastres (GRD), como el Decreto Supremo N°020-2015-Vivienda según el cual se deniega la titularidad en aquellas zonas de riesgo no mitigable. Ello supone un gran avance debido a la extendida práctica de ocupación de terreno en zonas de elevada pendiente y autoconstrucción de viviendas para obtener el título de propiedad. De esta manera se consigue reducir la exposición, aunque hay que trabajar en otros campos como el de la fragilidad por el que surgen proyectos como el presente de evaluación de la vulnerabilidad). Y finalmente queda un aspecto muy importante como es la educación para la reducción del riesgo ante desastre, lo que aumenta la resiliencia de la población y su capacidad de afrontar dichos fenómenos naturales.

2.- JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

Este proyecto surge como resultado de una estancia de prácticas en el Instituto Geofísico del Perú (Lima), donde me incorporo en el desarrollo del programa estatal "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres", concretamente aplicado a la ciudad de Huaral. Como segunda fase, tras la ejecución del estudio de Zonificación Sísmico-geotécnica, se desarrolla la cartografía que plasma la fragilidad de las viviendas expuestas en una zona sísmica, mediante una metodología de evaluación de la vulnerabilidad de las viviendas establecida como oficial para la República del Perú por CENEPRED (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres).

3.- ANTECEDENTES

El proyecto se enmarca dentro del Programa presupuestal N°068: *Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres* aprobado por el Gobierno de Perú en el año 2012. Supone una segunda fase tras la ejecución del proyecto "Zonas geográficas con gestión de información sísmica", del cual una de sus actividades fue la "Generación de estudios territoriales de peligro sísmico", obteniéndose como resultado final la "Zonificación sísmica-geotécnica del área urbana de la ciudad de Huaral".

Ese estudio permitió conocer el comportamiento dinámico del suelo a partir de la recolección de información y aplicación de métodos sísmicos, geofísicos, geológicos, geomorfológicos y geotécnicos. Los resultados obtenidos permiten identificar, según la Norma de Construcción Sismorresistente (Norma E.030), la existencia de una zona sísmica-geotécnica correspondiente a suelos de tipo S2 en la ciudad de Huaral (Tavera, 2015). Se trata de zonas en las que se incluyen áreas de terreno conformado por estratos superficiales de suelos granulares finos y suelos arcillosos con espesores que varían entre 3.0 y 10.0 m., subyaciendo a estos estratos grava eluvial o grava coluvial. Los periodos predominantes del terreno, determinados por las mediciones de microtrepidaciones, varían entre 0.3 y 0.5 s, correspondiendo a suelos de tipo S2 de la normativa sismorresistente peruana. En la zona la velocidad de las ondas de corte (Vs) varían entre 180 y 500 m/s.

Esta zonificación condiciona el tipo de estructura que se debe construir; es decir, tipo de material, geometría y número de pisos en las viviendas o grandes obras de ingeniería. Conocida la tipificación de los suelos, son los ingenieros quienes deben proceder a estimar las características adecuadas de los edificios a fin de reducir la vulnerabilidad de tales estructuras.

El mapa de zonificación sísmica-geotécnica para la ciudad de Huaral (Figura 2) se constituye como información primaria a ser utilizada por ingenieros civiles y arquitectos en el diseño y construcción de estructuras apropiadas para cada uno de los tipos de suelos identificados en el estudio. Asimismo, se trata de un documento técnico que debe constituirse como herramienta de gestión de riesgo a ser utilizado por las autoridades locales y regionales.

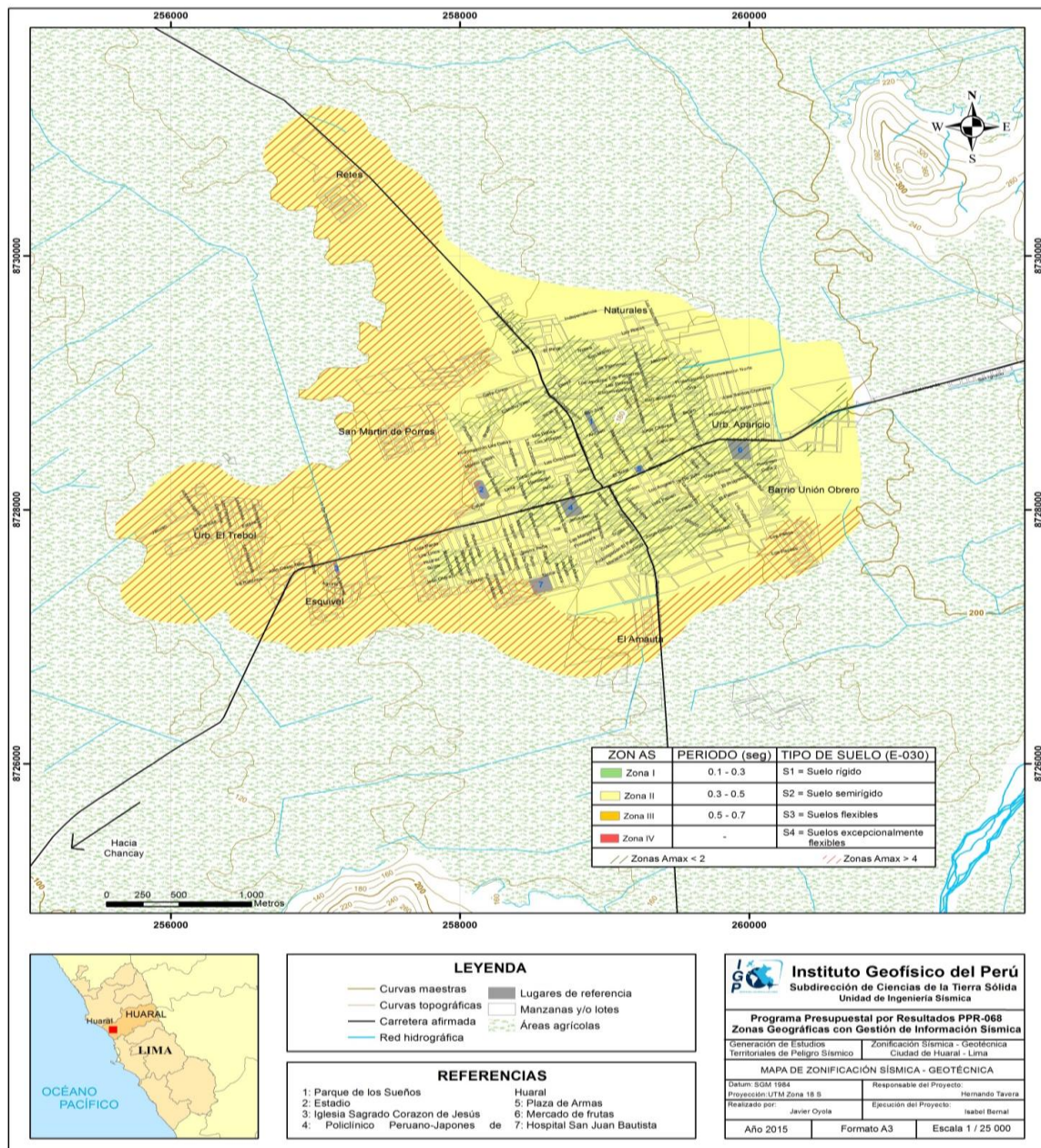


Figura 2: Mapa de zonificación sísmica-geotécnica para la ciudad de Huaral. Fuente: IGP.

Esta tipificación de suelos permite estimar el grado de peligrosidad de las diferentes zonas delimitadas. Añadiendo la evaluación del grado de vulnerabilidad de la población y las infraestructuras que se localizan sobre ellos, se obtiene la vulnerabilidad y conjuntamente puede estimar el nivel de riesgo.

Durante un terremoto, casi el 80% de las muertes se deben al desplome de viviendas y edificios, principalmente los de piedras y ladrillos sin ninguna estructura de cemento, siendo los de madera y/o quincha (carrizo) los más peligrosos. Así mismo, grandes edificios habitacionales mal diseñados se convierten en verdaderos asesinos de personas. A fin de tener una idea de la importancia de este parámetro, es necesario evaluar todos estos

aspectos y determinar el grado de vulnerabilidad de las construcciones y población que reside en ellas.

En esta línea, el Ayuntamiento de Huaral demanda al Instituto Geofísico del Perú la realización de una cartografía de valoración de la vulnerabilidad, de manera que se pueda tener de referencia a la hora de tomar decisiones políticas en cuestiones de planificación urbana. La idea es que el gobierno local implemente este estudio que hacemos desde la administración pública, y que debe activar políticas de reasentamiento si son necesarias, así como reforzamiento de viviendas u otras medidas de mitigación.

4.- OBJETIVOS

El objetivo fundamental del proyecto es **evaluar, y plasmar cartográficamente, el grado de vulnerabilidad de la población de la ciudad de Huaral**, en función de las características más relevantes de las infraestructuras, para determinar su fragilidad frente a un seísmo.

Tras estimar la peligrosidad del área de trabajo mediante el estudio de Zonificación sísmico-geotécnica, este proyecto supone la segunda fase en el proceso de evaluación del riesgo, centrándose en establecer el nivel de vulnerabilidad por fragilidad de las viviendas.

Se plantea como un documento técnico del que dispongan las autoridades locales y regionales y sirva de apoyo en la toma de decisiones, para el desarrollo y ejecución de proyectos orientados a la gestión del riesgo de desastres ante la ocurrencia de seísmos, lo cual conlleva a mejorar la calidad de vida de la población, así como mitigar los efectos originados por un seísmo de elevada magnitud.

El **proceso metodológico** para determinar el grado de vulnerabilidad por fragilidad conlleva a la consecución de los siguientes objetivos secundarios:

- Generación de una base de datos que recoja la información catastral disponible en parcelas georreferenciadas.
- Verificación de los datos disponibles, cumplimentación y actualización de los mismos.
- Estimación del grado de vulnerabilidad mediante el proceso analítico jerárquico (AHP).
- Generación de cartografía final de vulnerabilidad por fragilidad de las viviendas frente a seísmos, así como mapas parciales con las variables analizadas para su cálculo.

Por otro lado, este trabajo promueve la cultura de prevención en los actores sociales y políticos⁽¹⁾, a través de la difusión de los resultados del Mapa de Vulnerabilidad por Fragilidad frente a Seísmos, con el propósito de generar conocimientos y actitudes que permitan prever y reducir los desastres.

(1) Enlace de nota de prensa: <http://scts.igp.gob.pe/node/517>

5.- ÁREA DE ESTUDIO

Huaral es la capital de la provincia de Huaral, en el departamento de Lima. Se trata de una ciudad costera a 78 kilómetros al norte de Lima (Figura 3). Corresponde a un antiguo asentamiento, que ha crecido sin perder las características propias de una ciudad provinciana y que emerge como cosmopolita, sin necesidad de ser demasiado grande, ya que cuenta con la mayoría de los servicios y está accediendo al avance de la tecnología. La ciudad de Huaral cuenta con modernos edificios, pero ninguno de ellos pasa de los cuatro pisos de altura, conservando sus antiguas edificaciones, tanto en el denominado Huaral cuadrado como en sus barrios antiguos, donde lentamente las construcciones van reemplazando el adobe por el cemento.

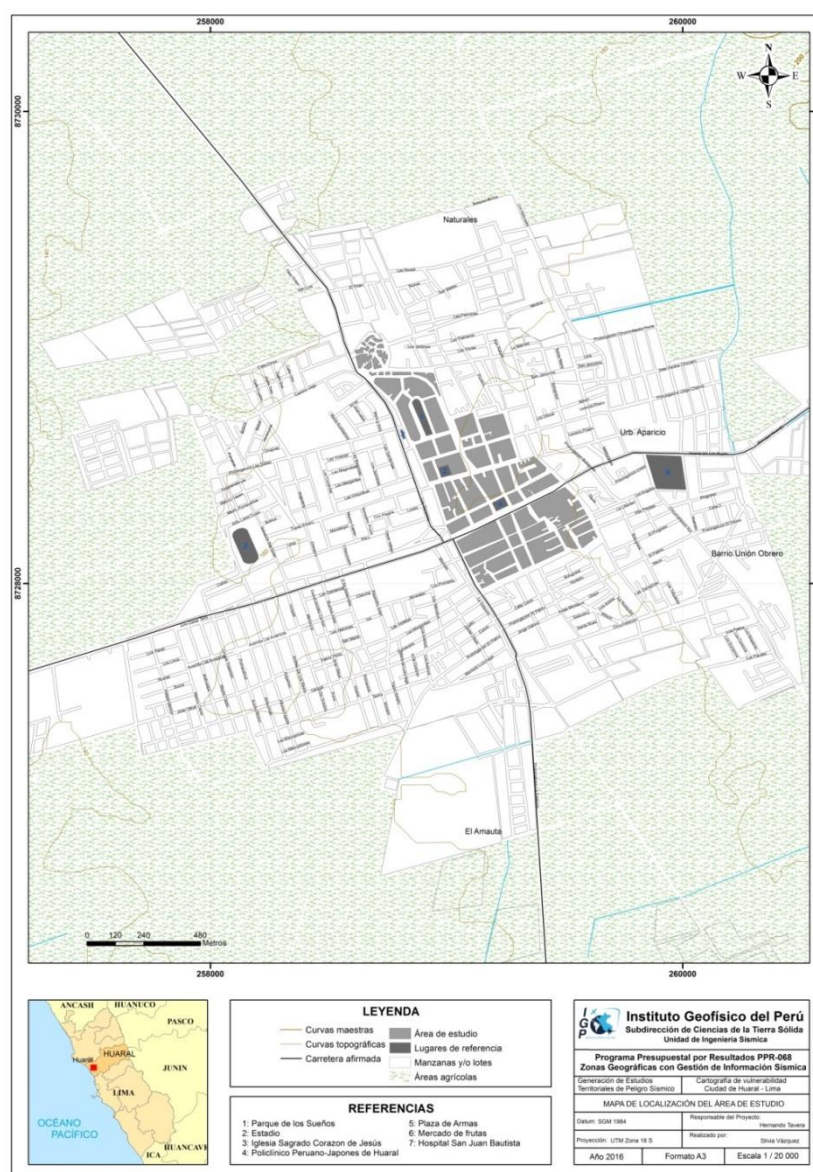


Figura 3: Área de estudio en el cuadrante noreste de la ciudad de Huaral.

Huaral, como la mayoría de las ciudades costeras del país, no ha sido ajena al proceso migratorio de los pobladores del interior del Perú que a partir de los años 60

empezaron a llegar a esta ciudad, para situarse en su entorno formando pueblos jóvenes, asentamientos humanos y centros poblados, muchos de los cuales nacieron producto de las invasiones humanas de los terrenos periféricos.

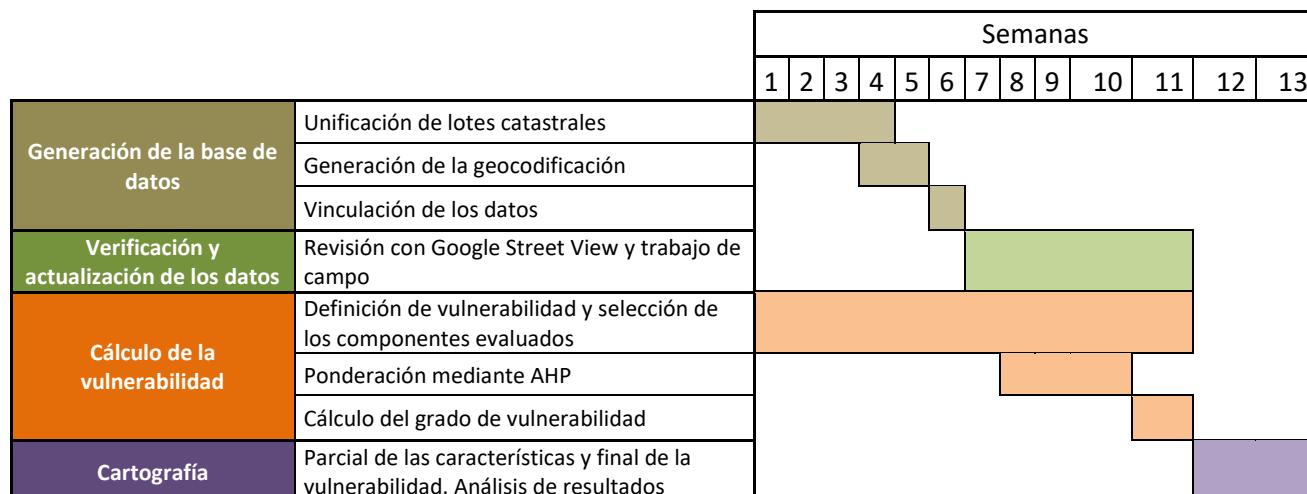
Se localiza en una zona de **silencio sísmico**, es decir, un área donde han ocurrido terremotos de grandes magnitudes en el pasado, pero donde llevan décadas sin producirse ninguno. El análisis espacio-temporal de los seísmos dentro del marco estadístico, permite estimar la periodicidad de los seísmos de mayor magnitud. En esa línea, un reciente informe realizado por Tavera (2014) indica que los estudios realizados sobre la distribución espacial de la sismicidad y de la deformación cortical han permitido identificar en el borde occidental de la región central de Perú dos importantes *asperezas* o zonas de acoplamiento sísmico que darán origen, en un futuro, a un seísmo de magnitud de orden de 8,5 Mw.

Se trata de una ciudad cuyo análisis de vulnerabilidad resulta altamente interesante, puesto que se encuentra localizada en uno de los territorios más frecuentemente afectados por seísmos de altas intensidades. Mientras que el riesgo sísmico está totalmente identificado, no ocurre lo mismo con su afección a la ciudad y sus habitantes.

6.- METODOLOGÍA

El CENEPRED, Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres del Perú, desarrolla en 2014 un manual oficial para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales. Este manual ha sido por tanto tomado como fuente primaria para aplicar la metodología que en él describe. Sin embargo, se trata de una metodología genérica para riesgos naturales, por lo que se ha incorporado el proceso analítico jerárquico desarrollado por Saaty (AHP), para ponderar las características de las viviendas, teniendo en cuenta cómo responden concretamente frente a seísmos.

Asimismo, se ha precisado de un **Sistema de Información Geográfica** para la creación de la geodatabase que recoja la información georreferenciada relativa a las características de las viviendas. Y por último, trabajo en campo y de gabinete con el apoyo de Google Street View para verificar, completar y actualizar los datos (Figura 4).



Cronograma: Cronograma del proyecto.

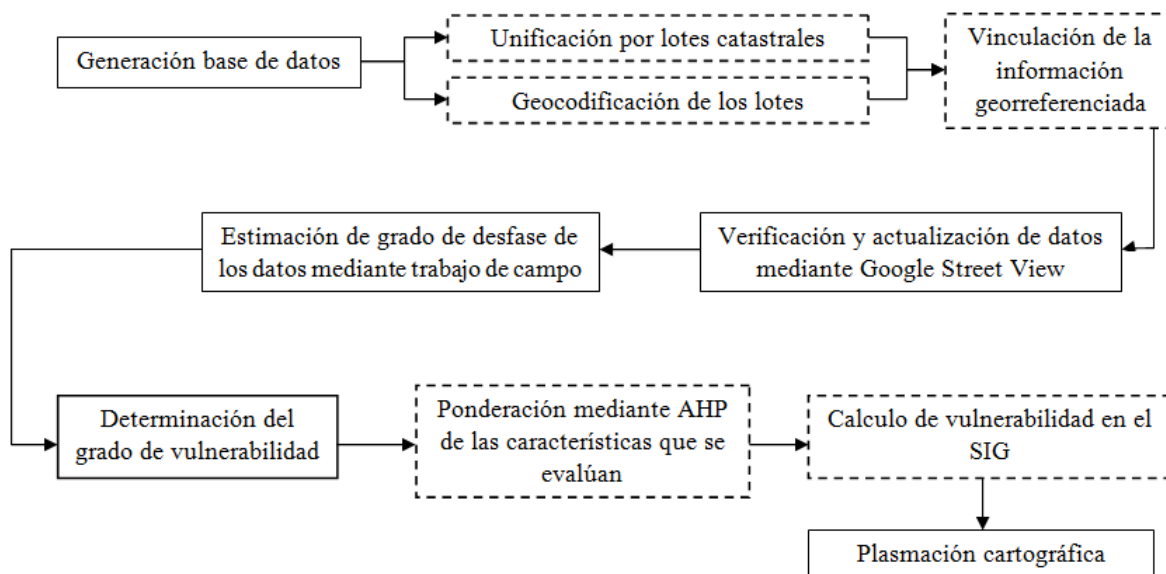


Figura 4: Diagrama del proceso metodológico.

Nombre	Descripción	Formato	Año	Fuente
Mapa de zonificación sísmico-geotécnica	Estudio que define tipos de suelos	Shp	2016	Instituto Geofísico del Perú
Plano catastral integral del área urbana	Representación y codificación de sectores, manzanas y lotes	CAD	2009	Oficina del Catastro del Ayuntamiento de la ciudad de Huaral
Fichas catastrales	Base de datos derivada de las fichas catastrales	Excel	2010	Oficina del Catastro
Fotos de las unidades catastrales	Fotos codificadas de las unidades catastrales	Imagen	2009	Oficina del Catastro

Tabla 1: Información de partida del estudio.

6.1.- Generación de la base de datos

El componente más importante de un SIG son los datos. Primero se requiere tener una buena base de datos y para lograr esto frecuentemente se invierte entre el 60 y 80% del tiempo del proyecto. Asimismo, recolectar buenos datos es un proceso largo, que demora el desarrollo del trabajo.

6.1.1.- Unificación de lotes catastrales

Desde la Oficina del Catastro del Ayuntamiento de Huaral se proporciona la información de 40.570 fichas catastrales urbanas individuales, correspondientes a cada una de las unidades catastrales registradas.

Según COFOPRI (Organismo de Formalización de la Propiedad Informal), se entiende por **unidad catastral** la “unidad mínima de referencia inventariada del catastro, georreferenciada, susceptible de ser inscrita en los Registros Públicos. Se considera como tal a la propiedad inmobiliaria que cuenta con independencia física, destinada a uno o varios usos, sobre la cual se ejercen responsabilidades administrativas municipales”.

Mientras que un **predio** es “una superficie encerrada en un perímetro, delimitado por una línea poligonal continua y cerrada; se extiende al subsuelo y al sobresuelo, comprendidos dentro de los planos verticales del perímetro”.

El estudio de vulnerabilidad se va a realizar por predios, por lo que es necesario unificar la información por unidades. Se trabaja en base al código de referencia catastral que concatena los códigos del departamento, la provincia, el distrito, el sector, la manzana, el lote, el edificio, la entrada, el piso, la unidad y un valor prefijado (Figura 5). Se han de unificar las características de todas aquellas unidades que presentan el mismo valor en los dígitos que hacen referencia al sector, la manzana y el lote, para poder definir el conjunto del predio (Figura 6).

CODIGO_CATASTRAL	ORDEN	NRO_PISO	FECHA_CONSTRUCCION	MATERIAL	ESTADO_CONSERVACION
01010560170202010010	1	02	2005/06	02	02
01010480180101010010	4	02	2009/09	02	03
01010480180101010010	3	02	2010/08	02	02
01010560170101010017	0	01	2001/01	02	03
01010560100101010010	0	01	1998/01	03	03
01010480180101010010	2	02	2010/07	02	02
01010560110102010012	0	01	1999/01	03	03
01010560110101010011	0	01	1999/06	03	03
01010480170101010018	0	01	1990/01	02	03
01010480160101010017	0	01	1980/01	03	03
01010560080101010017	0	01	1998/01	02	03
01010560080101010028	0	01	1990/01	02	03

Figura 5: Ejemplo de los datos sin unificar facilitados por la Oficina del Catastro del Ayuntamiento de Huaral.

CODIGO_NO_VALIDO	CODIGO_VALIDO	CODIGO_NO_VALIDO	NRO_PISO	Antigüedad	MATERIAL	ESTADO_CONSERVACION
00	00000000	0000000011	01	16	03	03
01	01001001	0101010018	02	14	03	02
01	01001001	0101010018	01	15	02	02
	01001001		02	15	02	02
01	01001002	0101010010	01	17	03	03
01	01001003	0101010011	01	12	03	02
01	01001005	0101010013	01	12	03	02
01	01001006	0101010014	01	18	03	02
01	01001007	0101010015	01	16	03	02
01	01001007	0101010026	01	16	03	02
	01001007		01	16	03	02

Figura 6: Ejemplo de datos catastrales unificados. Las agrupaciones señaladas en rojo hacen referencia a las unidades dentro del mismo lote catastral, mientras que las filas naranjas son los valores unificados para ese lote según los criterios establecidos.

De toda la información que disponen las fichas catastrales, se ha decidido trabajar con el material predominante en la construcción, el estado de conservación, el número de pisos y la antigüedad (Figura 7), por ser estas las características que mayor influencia tienen en la definición de la vulnerabilidad, según CENEPRED, así como por ser las que se pueden evaluar con mayor objetividad y velocidad en el proceso de verificación de datos.

Posteriormente, se evaluará la pendiente del predio también, sin embargo se trata de una información que no está disponible en las fichas catastrales y que por tanto hay que evaluar con otras herramientas.

MATERIAL_CONSTRUCCIÓN		ESTADO_CONSERVACIÓN		NÚMERO_PISOS		ANTIGÜEDAD		PENDIENTE	
codigo	descrip	codigo	descrip	codigo	descrip	codigo	descrip	codigo	descrip
01	Hormigón	01	Muy bueno	01	1 Piso	01	<10 años	01	<5°
02	Ladrillo	02	Bueno	02	2 Pisos	02	10-20 años	02	10-20°
03	Adobe	03	Regular	03	3 Pisos	03	20-30 años	03	20-30°
04	Quincha y/o estera	04	Malo	04	4 Pisos	04	30-40 años	04	25-45°
05	Madera	05	Muy malo	05	>=5 Pisos	05	>40 años	05	30-40°

Figura 7: Leyendas de codificación de los valores considerados para cada parámetro.

Para unificar estas características para cada predio, se han empleado criterios diferentes. En lo referente al material de construcción del conjunto de las unidades catastrales que conforman cada predio, se selecciona el material de la primera planta, puesto que es el nivel que se ve sometido a todo el peso de la edificación; todo ello en el caso de que las unidades conformen un mismo edificio, sin embargo si son dos edificios contiguos, se consideran dichas características de la construcción que tenga el material más vulnerable.

Respecto al estado de conservación, se selecciona el valor máximo, pues la fragilidad y posible derrumbe de una unidad catastral, con independencia de su localización, va a introducir la inestabilidad en el conjunto del lote, aumentando las posibilidades de que sufra un colapso/derrumbe.

Por otro lado, para el número de pisos se selecciona el valor más alto, ya que a mayor altura del edificio, mayor es el movimiento que genera el seísmo. Para el caso de la antigüedad, se opta por el año de construcción más antiguo, en tanto que el pasar de los años aumenta su fragilidad.

De esta manera se reduce la cantidad de información de 40.570 unidades a 17.367 lotes, asignándoles un valor representativo de cada una de las variables que se van a emplear para estimar el grado de vulnerabilidad de cada lote catastral.

6.1.2.- Generación de la geocodificación de los lotes

El punto de partida es un archivo CAD que recoge el plano catastral de 2009 de la ciudad de Huaral. A ese documento se le han de hacer los cambios propios de este tipo de formato para poder trabajarlo en el software ArcGIS (Figura 8).

Para crear un geocódigo para cada lote, en el que vincular la información de las fichas catastrales, se ha recoger el código del sector, la manzana y del propio lote, por ello se extraen del CAD los límites de los sectores, de las manzanas y de los lotes, así como sus etiquetas correspondientes.

Tras hacer la conversión del formato vectorial del CAD a un shapefile poligonal de SIG, se aplica la función “Unión espacial” para que los polígonos definidos en las tres capas con las que se trabaja tomen el código que les corresponda. Posteriormente, desde el

shapefile de lotes, la función “Unión espacial” de nuevo permite extraer la información sobre el distrito y la manzana que le corresponde a cada uno de los predios. De esta manera, teniendo los tres códigos en la misma capa, se concatenan para crear una geocodificación que identifique a cada lote.

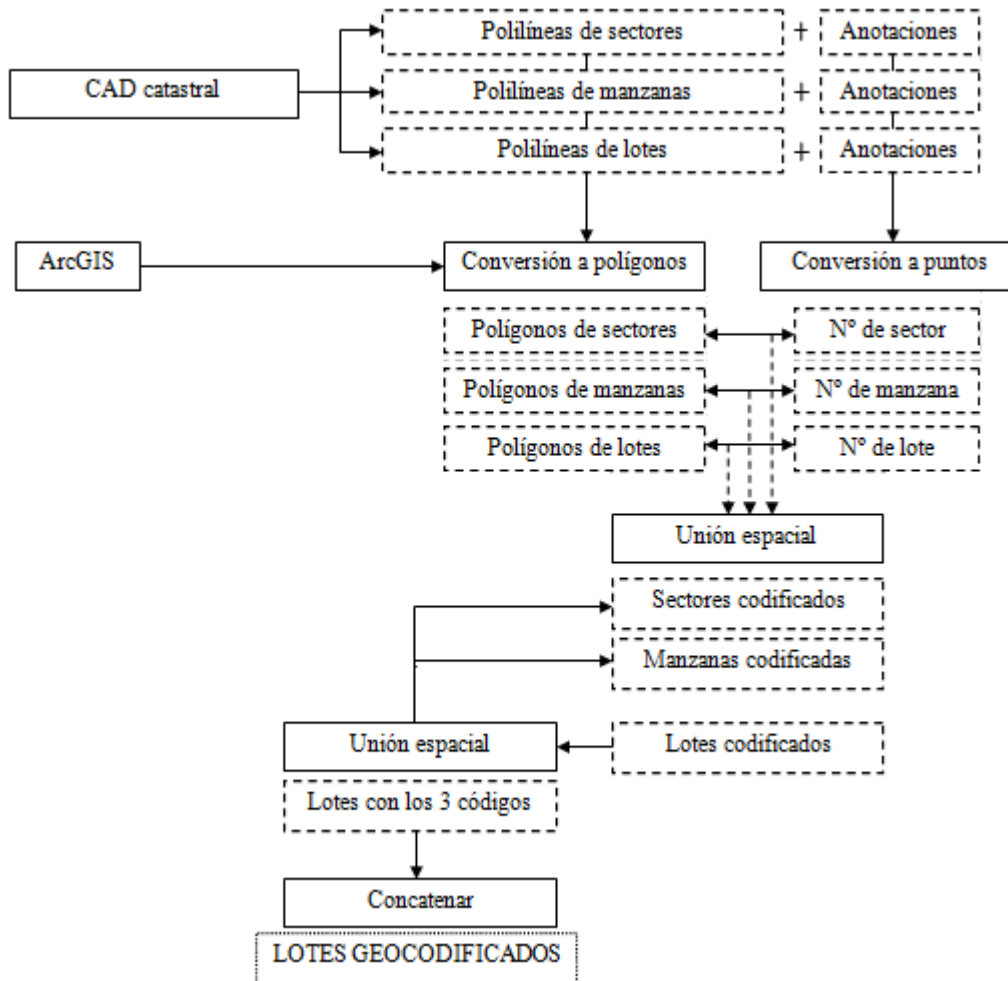


Figura 8: Diagrama del flujo de trabajo para la generación de la geocodificación de los lotes.

6.1.3.- Vinculación de los datos

Como último paso para la conclusión de la base de datos, se vincula la información de las fichas catastrales a cada uno de los lotes georreferenciados mediante la función *join* del software ArcMap.

Una revisión de los datos tras la ejecución de la función nos muestra lotes sin los datos relativos a las características seleccionadas para evaluarlas y con ellas determinar el grado de vulnerabilidad por fragilidad de la infraestructura. Se trata de un problema que sucede por la falta de actualización anual de las fichas catastrales, acrecentado por la dinámica expansionista que ha experimentado la ciudad de Huaral en los últimos años. De cualquier manera no se trata de un problema con mayor relevancia, en tanto que va a ser

necesaria la verificación de los datos, así como su actualización, por tanto para estos lotes sin datos de partida habrá que realizar un trabajo menor de cumplimentación adicional.

6.2.- Verificación de datos y actualización

Google Street View (GSV) es una herramienta ofrecida a través de Google Maps y Google Earth, que proporciona imágenes panorámicas (360° de movimiento horizontal y 290° de movimiento vertical), permitiendo al usuario ver dinámicamente partes de la ciudad.

La flexibilidad de la vista que proporciona esta herramienta es adecuada para el trabajo de verificación y actualización que se realiza de la base de datos catastrales, ya que permite observar los edificios no solamente de manera frontal (perspectiva que ya ofrecen las fotos catastrales), sino también lateralmente, lo que posibilita apreciar la estructura del edificio, que normalmente queda al descubierto en este plano. Es un aspecto especialmente relevante a la hora de evaluar el estado de conservación, pues ocurre que en ocasiones la fachada tiene una buena presencia, sin embargo la estructura de la vivienda evidencia una fragilidad de todo el edificio (Imagen 2).



Imagen 2: Vista lateral de la vivienda (izquierda), que evidencia una construcción con materiales detríticos débilmente compactados y escasamente resistentes en caso de sismo; y vista de la fachada de la vivienda (derecha).

GSV dispone de imágenes de 2013/2014 para el área de estudio, mientras que la información para cada lote facilitada por las fichas catastrales es de 2010, por lo que esta herramienta permite actualizar los datos hasta 4 años. Durante ese proceso de actualización

se constatan cambios sustanciales en la ciudad, que se refieren principalmente a una elevación en planta de los edificios (Imagen 3).



Imagen 3: Cambios experimentados por una vivienda entre 2010 (izquierda) y 2014 (derecha).

Asimismo es necesario trabajo de campo para realizar la verificación de datos para aquellas zonas de las que GSW no dispone de imágenes, por el carácter abrupto que presentan estas zonas marginales. Además, eran áreas, concretamente la del cerro de San Cristóbal, a las que había que acercarse personalmente para evaluar la pendiente sobre la que se encuentran asentadas las viviendas. Se trata de una característica valorada solamente en esta zona (Imagen 4), pues el resto de la ciudad no presenta desniveles significativos.



Imagen 4: Vista de los callejones de ascenso al cerro de San Cristóbal.

Los resultados obtenidos en este estudio dependen de la información de partida facilitada por la Oficina de Catastro, sin embargo, con el proceso de actualización de la misma mediante GSW puede estar sujeta a fallos de interpretación y observación. El posterior trabajo en campo para la toma de material fotográfico permitió realizar una reevaluación de la base de datos, a fin de elevar la calidad de los resultados.

6.3.- Cálculo de vulnerabilidad

Si bien es cierto que la metodología desarrollada por CENEPRED (CENEPRED, 2014) hace una definición concreta de vulnerabilidad y desglosa todos sus componentes (Figura 9), se trata de un manual genérico para la evaluación de todos los riesgos naturales presentes en Perú. Para ajustar las ponderaciones, que definen la diferente importancia de las características de las viviendas frente a un sismo, se ha planteado desarrollar un proceso analítico jerárquico que ajuste esas ponderaciones al fenómeno concreto con el que se trabaja.

6.3.1- Definición de vulnerabilidad y caracterización de los componentes evaluados

INDECI (2006) define vulnerabilidad como "el grado de debilidad o exposición de un elemento o conjunto de elementos frente a la ocurrencia de un peligro natural o antrópico de una magnitud dada".

Andrew Maskrey (1998) define la vulnerabilidad como "una relación entre la población, medio ambiente, relaciones, formas y medios de producción".

La terminología propuesta por la UNISDR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres) define como vulnerabilidad a las características y las circunstancias de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza.

En este estudio la definición de la **vulnerabilidad** viene dada por la Ley N° 29664 del Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres del Gobierno del Perú y su Reglamento (D.S. N° 048-2011-PCM) que la entiende como "la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza".

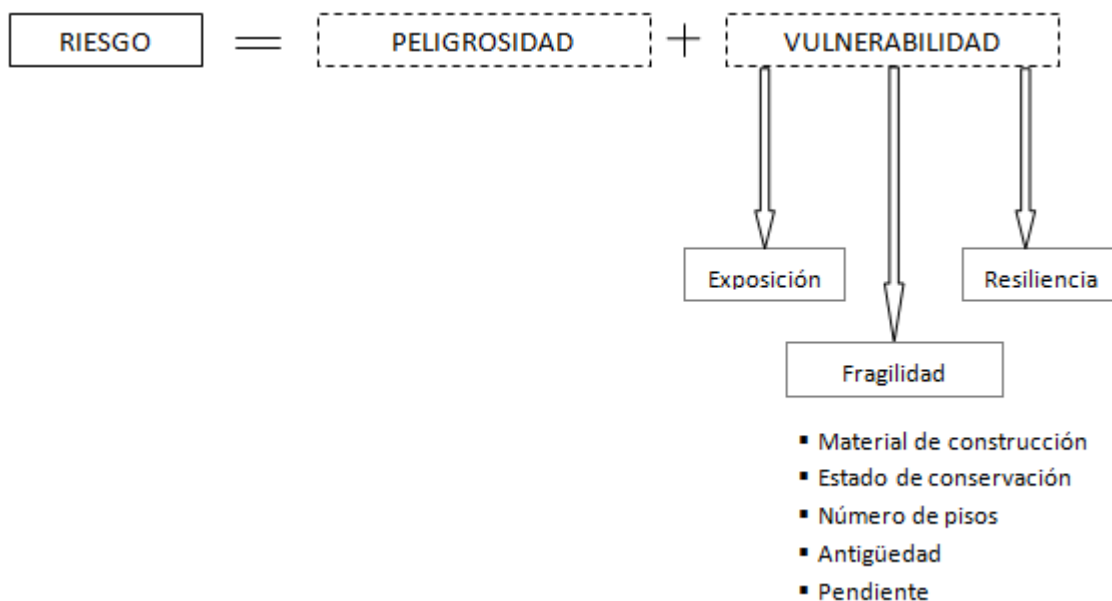


Figura 9: Componentes del riesgo y de la vulnerabilidad, según CENEPRED.

En el presente estudio entenderíamos como **peligrosidad** la activa situación sísmica que presenta la costa central de Perú, que expone a la ciudad de Huaral a la ocurrencia de un sismo de VIII grado. De los componentes del concepto de vulnerabilidad, el factor de exposición ya se encuentra definido también, en tanto que el asentamiento de la ciudad de Huaral está conformado por sustratos de Tipo S2, en los que la propagación de las ondas sísmicas es intermedia, por lo tanto sí que existe riesgo de amplificación de las mismas. El factor de resiliencia se omite por falta de datos y tiempo para recolectarlos, además de que

se trabaja a una escala de lote, es decir, muy pequeña para recabar tal cantidad de información para un área de estudio tan grande. La falta de estos datos impide caracterizar la respuesta de la población en caso de seísmo, por lo tanto, queda sin prever la posible actuación post-seísmo. Finalmente, se opta por evaluar la fragilidad de los bienes materiales, por ser un factor objetivo y del que se dispone de información de partida, además de ser el factor con mayor peso para determinar el grado de vulnerabilidad según CENEPRED.

El crecimiento poblacional y los procesos de urbanización, las tendencias en la ocupación del territorio (Imagen 5), el proceso de empobrecimiento de importantes segmentos de la población, la utilización de sistemas de gobernanza inadecuados y la presión sobre los recursos naturales, han hecho aumentar en forma continua la vulnerabilidad de la población frente a una amplia diversidad de fenómenos de origen natural.



Imagen 5: Asentamiento urbano en el entorno metropolitano de Lima.

La dilatada reflexión sobre el tema del riesgo (Saint-Michel, 2007-2008) nos muestra claramente que en muchas ocasiones no es posible actuar sobre el peligro o amenaza, y bajo este enfoque es factible comprender que para reducir el riesgo no habría otra alternativa que disminuir la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

La **vulnerabilidad** considera tres factores: exposición, fragilidad y resiliencia (CENEPRED, 2014). La exposición refiere a las decisiones y prácticas que ubican al ser humano y sus medios de vida en la zona de impacto de un peligro. La **exposición** se genera por una relación no apropiada con el ambiente, que se puede deber a procesos no planificados de crecimiento demográfico, a un proceso migratorio desordenado, al proceso de urbanización sin un adecuado manejo del territorio y/o a políticas de desarrollo económico no sostenibles. A mayor exposición, mayor vulnerabilidad. Con este

componente se analizan las unidades sociales expuestas (población, unidades productivas, líneas vitales, infraestructura u otros elementos) a los peligros identificados.

La **fragilidad** está referida a las condiciones de desventaja o debilidad relativa del ser humano y sus medios de vida frente a un peligro. En general, está centrada en las condiciones físicas de una comunidad o sociedad y es de origen interno, por ejemplo: formas de construcción, no seguimiento de normativa vigente y/o materiales, entre otros. A mayor fragilidad, mayor vulnerabilidad.

Finalmente, la **resiliencia** hace referencia al nivel de asimilación y capacidad de recuperación del ser humano y sus medios de vida frente a la ocurrencia de un peligro. Está asociada a condiciones sociales u de organización de la población. A mayor resiliencia, menor vulnerabilidad.

Cada uno de estos tres componentes de la vulnerabilidad considera la perspectiva social, económica y ambiental de los elementos que analiza. Cada uno de estos componentes evalúa una serie de parámetros, de manera que conjuntamente se obtenga una caracterización de la población y las edificaciones donde habitan, y se pueda estimar un nivel de vulnerabilidad.

Para este estudio de la ciudad de Huaral, se trabaja a escala de predios. Desde el Ayuntamiento de Huaral se facilita toda la información catastral, así como de datos de las infraestructuras del municipio. Sin embargo, no se contaba con datos sociales de la población residente, para poder trabajar con resiliencia, por lo que nos hemos centrado en el componente de fragilidad.

Se debe recalcar que no existen metodologías estándares para estimar la fragilidad de las estructuras. El resultado de los estudios de vulnerabilidad es un índice de daño que caracteriza la degradación que sufriría un estructura de una tipología dada y sometida a la acción de un seísmo de determinadas características (Ochoa, 2012).

Se ha trabajado en la adquisición de nociones en ingeniería civil que permitan formar un criterio experto a la hora de evaluar las edificaciones, prestando especial atención a aquellos aspectos más relevantes de las construcciones para la respuesta del edificio frente a un seísmo. En cada una de las características analizadas a continuación se remarcan las particularidades a tener en cuenta en cada caso.

En función de la información disponible que nos han podido facilitar desde el Ayuntamiento, así como de la mayor relevancia de algunos parámetros a la hora de evaluar la vulnerabilidad se han considerado los siguientes (INDECI, 2010):

1. Material predominante de construcción en la edificación

Cuando los fenómenos producen fuerzas que alcanzan la resistencia de los materiales es cuando se dañan los elementos estructurales. Aunque también se pueden sufrir daños si hay errores constructivos o de diseño, o la calidad de los materiales no es la adecuada.

Los materiales deben ser de buena calidad para garantizar una adecuada resistencia y capacidad de la estructura para absorber y disipar la energía que el seísmo le transmite a la edificación cuando se produce. Materiales frágiles, poco resistentes, con discontinuidades se rompen fácilmente ante la acción de un terremoto, provocando el colapso del edificio y poniendo en riesgo la vida de las personas que lo habitan.

Un estudio propuesto por Sauter (2000) considera las relaciones promedio de daños para diferentes materiales de construcción según la intensidad sísmica a la que son expuestos en la escala de Mercalli (Figura 10). Con esta clasificación se busca establecer la diferencia entre los tipos de materiales usados en la construcción y determinar su influencia en el escenario de un seísmo (Ochoa, 2012).

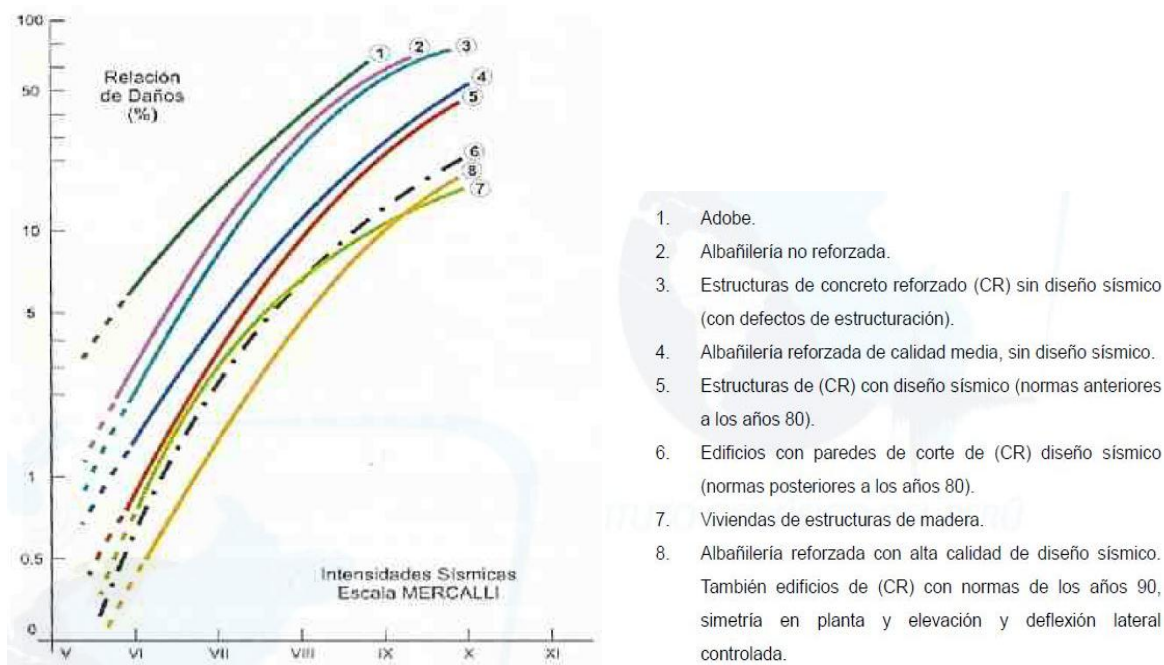


Figura 10: Relación promedio de daño en los tipos de materiales de construcción. Fuente: Castro (2014).

Los materiales más empleados para la edificación en países en vías de desarrollo son estera/cartón, madera, quincha (caña con barro), adobe o tapia, ladrillo, y bloque de cemento, los cuales presentan una fragilidad de menor a mayor correspondientemente como se aprecia en el gráfico de la figura 10.

Los mejores materiales para la construcción son el ladrillo, cemento, acero y materiales no metálicos como la arena y grava, que mediante un adecuado manejo profesional establecido por el Reglamento Nacional de Edificaciones (Decreto Supremo N° 011-2006-Vivienda, de la República del Perú) garantiza un mejor comportamiento frente a los movimientos sísmicos.

El barro tiene el gran inconveniente de no soportar las consecuencias de seísmos o la acción del agua. Por su parte, la madera tiene una fuerza por unidad de peso mayor respecto a muchos otros materiales y es, por eso, muy adecuada para la construcción

sismorresistente, pero produce un importante impacto ambiental (López, 2014). El hormigón puede ser uno de los materiales más resistentes a los seísmos, pero siempre que esté acompañado de un buen diseño, y ello implica un diseño adecuado de las columnas, el punto débil de las estructuras de hormigón. Finalmente, destacar el ladrillo, uno de los materiales más empleados en la construcción de viviendas, y que, si no se ve afectado por humedades y se encuentra confinado por una estructura de hormigón, se trata de un buen material en el campo de la sismorresistencia.

2. Estado de conservación y antigüedad

En este sentido se va a considerar la presencia de daños en la estructura, que comprometen la estabilidad de la construcción. Puede tratarse de agrietamientos, índices elevados de humedad, derrumbes parciales o instalaciones básicas deterioradas.

Se diferencian 5 categorías (CENEPRED, 2014):

- Muy bueno: Las edificaciones reciben mantenimiento permanente y no presentan deterioro alguno.
- Bueno: Las edificaciones reciben mantenimiento permanente y sólo tienen ligeros deterioros en los acabados debido al uso normal.
- Regular: Las edificaciones reciben mantenimiento esporádico, sus estructuras no tienen deterioro y si lo tienen no comprometen el edificio al ser subsanable. También es posible que los acabados e instalaciones tengan un deterioro visible debido al mal uso.
- Malo: Las edificaciones no reciben mantenimiento regular, cuya estructura acusa deterioros, aunque sin peligro de desplome, pero los acabados e instalaciones tienen visibles desperfectos.
- Muy malo: Las edificaciones presentan un deterioro tal en las estructuras que hace presumir de colapso.

En lo referente a la antigüedad, el tiempo útil de vida de las viviendas es de 50 años (Barrios, 2014), por lo tanto, todas aquellas que tengan una antigüedad superior van a presentar una vulnerabilidad alta. Las construcciones más recientes se encuentran en aparente condición óptima para soportar un seísmo de gran magnitud, mientras que las que ya tienen varias décadas frecuentemente empiezan con una falta de mantenimiento, hasta encontrarse en estado ruinoso, tornándose más vulnerables a un evento sísmico.

3. Número de pisos

Cuando se somete una construcción a movimiento horizontal del terreno, se generan fuerzas laterales (fuerzas de inercia o fuerzas sísmicas). Las fuerzas a las que es sometida la estructura dependen de su masa y de su altura; mientras más peso en la parte superior, mayor es la fuerza lateral que se generará en la construcción (López, 2014). Estas fuerzas

sísmicas se transmiten del techo hacia los elementos resistentes (muros, columnas), que a su vez las transmiten a los pisos inferiores y finalmente a la cimentación, que transfiere dichas fuerzas al terreno de apoyo.

Para resistir estas fuerzas la estructura debe tener una cantidad y distribución adecuada de elementos resistentes, como columnas o muros de carga, así como elementos horizontales que distribuyan las fuerzas sísmicas entre dichos elementos. Cuando se excede la resistencia de los elementos estructurales, la edificación sufre daños como agrietamientos, aplastamientos o grandes deformaciones que pueden llegar incluso al colapso (derrumbe total del edificio).

Este problema todavía se agrava al encontrarnos con gran cantidad de viviendas de autoconstrucción, que no cuentan con elementos estructurales de repartición de cargas, por lo tanto su fragilidad aumenta exponencialmente.

4. Pendiente

Las viviendas construidas en laderas o terrenos con fuerte pendiente tienen la desventaja del empuje que ejerce el terreno sobre la parte lateral de éstas, incrementando la acción de las ondas sísmicas y haciéndolas más vulnerables. Este aspecto no sucede en las viviendas asentadas en terrenos planos donde el empuje lateral es nulo o casi nulo, dándoles una mayor estabilidad (INDECI, 2010).

6.3.2. Ponderación mediante AHP

Para el análisis estadístico de la información, se emplea el proceso analítico jerárquico (AHP), desarrollado por Saaty (1977), y así determinar el peso que cada una de las variables estudiadas tienen en el cálculo final del grado de vulnerabilidad de cada lote. El AHP es una herramienta para el análisis multicriterio en la toma de decisiones para lo cual se estableció una escala para la valoración de juicios, ampliamente utilizada por CENEPRED (Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres) para cuantificar el criterio de los técnicos en Gestión de Riesgo de Desastres.

Es un método de descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenando estas variables en una estructura jerárquica, donde se obtienen valores numéricos para los juicios de preferencia y, finalmente, para determinar qué variable tiene la prioridad más alta (Pacheco, 2008).

La metodología AHP (Figura 11) está fundamentada en una base teórica que propone una manera de ordenar el pensamiento analítico y de la cual destacan tres principios: construcción de jerarquías, establecimiento de prioridades y principio de consistencia lógica.

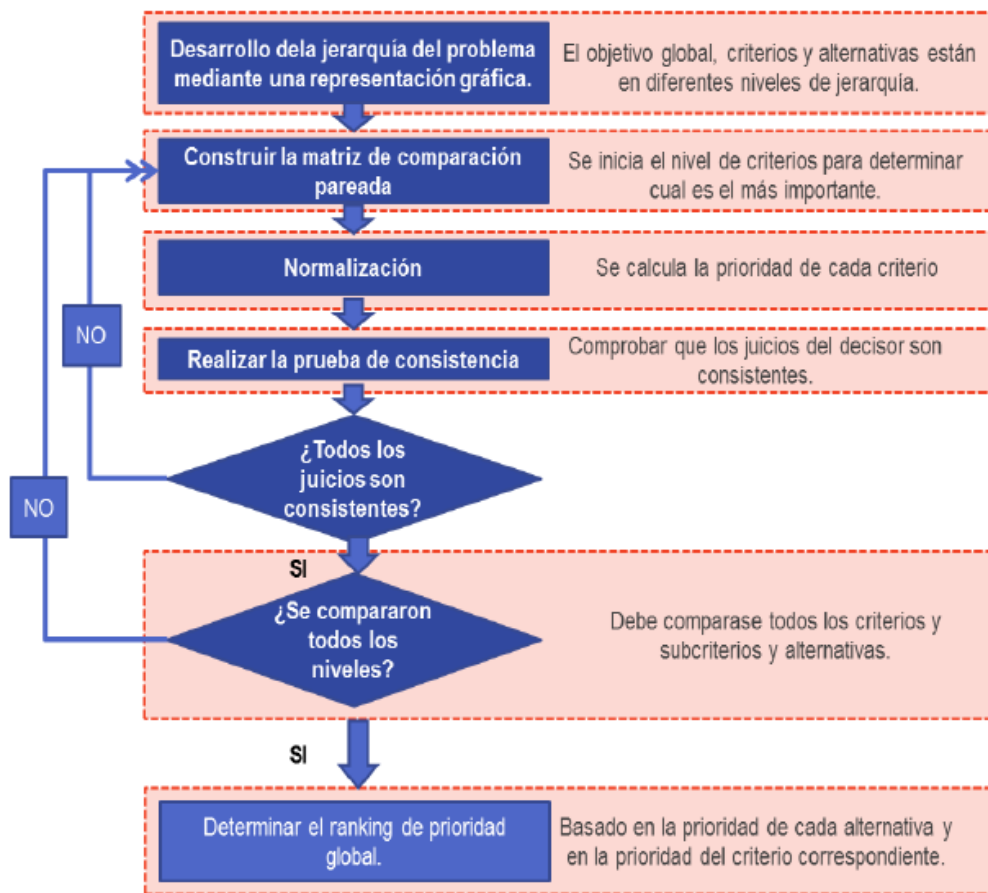


Figura 11: Diagrama del flujo del Proceso Analítico Jerárquico. Fuente: Ho, W. (2006).

- Construcción de jerarquías: son aquellas que conducen un sistema hacia un objetivo deseado como la solución de conflictos, desempeño eficiente o la determinación de un escenario. El esquema jerárquico está compuesto por:
 - Objetivo o foco: Es lo que se espera resolver, el objetivo principal.
 - Criterios: Son los elementos que definen el objetivo principal.
 - Subcriterios: Son los elementos cuantificables que definen el criterio debajo del cual se encuentran.
 - Alternativas: Son diferentes soluciones o cursos de acción.
- Establecimiento de prioridades: El cálculo de la prioridad se realiza en función de comparaciones a pares con respecto a un criterio dado. Para comparar los elementos se forma una matriz y se pregunta: ¿Cuánto supera este elemento al elemento con el cual se está comparando- en la medida en que posee la propiedad, contribuye a ella, la domina, influye sobre ella, la satisface, o la beneficia?

El segundo principio que destaca de este método multicriterio es el establecimiento de prioridades entre los elementos de la jerarquía. Se propone una escala de prioridades

como forma de independizarse de las diferentes escalas que existen entre sus componentes (Tabla 2). Los seres humanos perciben las relaciones entre los elementos que describen una situación, pueden realizar comparaciones a pares entre ellos con respecto a cierto criterio y de esta manera expresar la preferencia de uno sobre otro. La síntesis del conjunto de estos juicios arroja la escala de intensidades de preferencias (prioridad) entre el total de elementos comparados. De esta forma es posible integrar el pensamiento lógico con los sentimientos, la intuición (que es reflejo de la experiencia), etc. Los juicios que son ingresados en las comparaciones corresponden a pares responden a estos factores.

Escala	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a un criterio sobre el otro
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente un criterio sobre el otro
7	Muy fuerte o demostrada	Un criterio es mucho más importante que el otro; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia favorece un criterio sobre el otro, es absoluta y totalmente clara
2,4,6,8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre valores adyacentes

Tabla 2: Escala de valoración propuesta por Saaty (1980).

Tipos de comparaciones pareadas:

- 1.- Importancia: Apropiado cuando se comparan criterios entre sí.
- 2.- Preferencia: Apropiado cuando se comparan alternativas.
- 3.- Más probable: Usado cuando se compara la probabilidad de los resultados, ya sea con criterios o con alternativas.

Las comparaciones permiten crear una matriz para cada criterio o subcriterio de la jerarquía y que permita determinar la prioridad de elementos de su nivel inmediatamente inferior, usando una escala de proporciones.

- Principio de consistencia lógica: Los seres humanos tienen la capacidad de establecer relaciones entre los objetos o sus ideas, de manera que sean consistentes; es decir, para que sus relaciones funcionen bien entre sí y muestren congruencia. En este sentido la consistencia debe implicar dos cosas:

- Transitividad: Se debe respetar las relaciones de orden entre los elementos; es decir, si A tiene mayor importancia que C y C es más importante que B, entonces la lógica dice que A es más importante que B.

- Proporcionalidad: Las proporciones entre los órdenes de magnitud de estas preferencias también deben cumplirse con un error de rango permitido. Por ejemplo, si A es tres veces más importante que C y C es dos veces más importante que B, entonces A debe ser seis veces más importante que B. Éste sería un juicio 100% consistente (se cumple la relación de transitividad y de proporcionalidad). La escala a que se hace referencia existe en el inconsciente, no está explícita y sus valores no son números exactos, lo que existe en el cerebro es un ordenamiento jerárquico para los elementos.

Dada la ausencia de valores exactos para la escala, a mente humana no está preparada para emitir juicios 100% consistentes (que cumplan las condiciones de transitividad y proporcionalidad).

La consistencia tiene relación con el grado de dispersión de los juicios del actor. Los juicios consistentes imponen dos propiedades de forma simultánea:

- Transitividad de las preferencias: Si C1 es mejor que C2 y C2 es mejor que C3, entonces se espera que C1 sea mejor que C3.

- Proporcionalidad de las preferencias: Si C1 es tres veces mayor que C2 y C2 es 2 veces mayor que C3, entonces se espera que C1 sea 6 veces mayor que C3.

Por supuesto, es necesario, cierto grado de consistencia en la fijación de prioridades para los elementos con respecto a algún criterio para obtener resultados válidos en el mundo real. El AHP mide la inconsistencia global de los juicios mediante la Proporción de Consistencia, que es el resultado de la relación entre el Índice de Consistencia y el Índice Aleatorio. El Índice de Consistencia es una medida de la desviación de la consistencia de la matriz de comparaciones a pares, mientras que el Índice Aleatorio es el índice de consistencia de una matriz recíproca aleatoria, con recíprocos forzados, del mismo rango de la escala de 1 a 9. El valor de esta proporción de consistencia no debe superar el 10%, para que sea evidencia de un juicio formado. Esto dependerá del tamaño de la matriz de comparación por pares.

EJEMPLO DE APLICACIÓN AL CASO DE ESTUDIO:

Se trata de una secuencia que repetimos con todos los parámetros que distingue cada una de las cinco características que se evalúan de los edificios, así como entre estas cinco variables, para determinar una jerarquía entre las mismas, que define qué característica tiene más importancia a la hora de determinar el grado de fragilidad del edificio. Sin embargo, al tratarse de un proceso secuencial análogo para todas las variables (Ver anexo), tan sólo se va a presentar el desarrollo efectuado para la variable "material de construcción".

Previo al desarrollo del AHP, se define como objetivo la determinación de cuáles son las características de las viviendas que influyen en mayor o menor medida en su fragilidad, así como cuantificar en qué proporción le afectan determinados parámetros dentro de cada variable analizada.

Los **criterios** serían las cinco características que evaluamos, a saber: material de construcción predominante, estado de conservación, número de pisos, antigüedad y pendiente; mientras que los parámetros serían las categorías dentro de cada una de ellas (Figura 7).

Así, una vez cuantificada la importancia que cada uno de ellos juega en la fragilidad de los edificios, se pueden ponderar las características que reúne cada uno de nuestros lotes y definir un grado de vulnerabilidad por fragilidad.

Es posible aplicar este tipo de análisis para dar la ponderación a las variables; por ejemplo, en este caso se quiere saber cuánto más importante es el material de construcción que el estado de conservación en una construcción para un análisis de vulnerabilidad física, para lo cual se debe considerar el criterio adquirido con el aprendizaje de nociones en ingeniería civil (López, 2014; Minke, 2005); además la escala establecida por Saaty (1980) proporcionará una ponderación adecuada.

Para explicar mejor el procedimiento se considera como ejemplo el análisis de los materiales de construcción más empleados. Se requiere saber cuál de estos materiales tiene mayor peso en el análisis de vulnerabilidad de una vivienda frente a un movimiento sísmico. Para esto, realizamos la comparación entre los diferentes tipos de materiales predominantes en la construcción (tabla 3), y se establece entre pares una comparación donde se determina cuál de las dos variables influye más en la vulnerabilidad por fragilidad, para luego evaluar por cuánto es más importante una variable sobre la otra.

En nuestro caso de estudio, se realizan comparaciones pareadas por importancia, ya que se ponderan más altos aquellos materiales de las viviendas que son más importantes cuando hablamos de fragilidad, es decir, que son más vulnerables en caso de sismo.

El punto de partida es una **matriz de doble entrada**, donde la comparación entre los mismos elementos es 1, conformando una diagonal, siendo los números por debajo y por encima de dicha diagonal inversos entre sí. Se hace una comparación pareada de los criterios asignándole valores según la escala de Saaty (Tabla 2), respondiendo a la siguiente pregunta: ¿Cuánto más vulnerable es la *quincha* sobre la *madera*? (Y así reiteradamente entre criterios).

De esta manera, se establece la importancia relativa para cada criterio. En el cuadro inferior (Tabla 3) se puede observar que la quincha es nueve veces más importante que la madera a la hora de determinar la fragilidad de un edificio (ver columna dos, fila seis); de igual modo se podría decir que la madera posee una novena parte de la importancia de la quincha (ver columna seis, fila dos), ya que se trata de un material muy frágil en caso de sismo y por ello es más importante, porque que hay que tenerlo más en cuenta.

PARAMETRO	Madera	Hormigón	Ladrillo	Adobe	Quincha
Madera	1.00	0.50	0.20	0.13	0.11
Hormigón	2	1.00	0.33	0.20	0.14
Ladrillo	5	3	1.00	0.33	0.20
Adobe	8	5	3	1.00	0.50
Quincha, estera, etc.	9	7	5	2	1.00
SUMA	25.000	16.500	9.533	3.658	1.954
1/SUMA	0.040	0.061	0.105	0.273	0.512

Tabla 3: Matriz de vulnerabilidad

El siguiente paso es **normalizar la matriz**, con la que obtendremos el vector de priorización (peso ponderado), que indica la importancia de cada parámetro en el análisis del fenómeno.

Se divide cada celda de la primera columna de la matriz original entre la inversa de la suma total de dicha columna, y así sucesivamente para las demás columnas (Tabla 4). Con la suma promedio de cada fila se obtiene el vector de prioridad de cada parámetro (Tabla 5).

PARAMETRO	Madera	Hormigón	Ladrillo	Adobe	Quincha
Madera	0.040	0.030	0.021	0.034	0.057
Hormigón	0.080	0.061	0.035	0.055	0.073
Ladrillo	0.200	0.182	0.105	0.091	0.102
Adobe	0.320	0.303	0.315	0.273	0.256
Quincha, estera, etc.	0.360	0.424	0.524	0.547	0.512

Tabla 4: Matriz de normalización

Vector Priorización	Peso ponderado
0.036	3.6
0.061	6.1
0.136	13.6
0.293	29.3
0.473	47.3

Tabla 5: Vector de priorización y peso ponderado

Finalmente, se calcula la **Relación de Consistencia (RC)**, la cual debe ser menor al 10% ($RC > 0.1$), lo que nos indica que los criterios utilizados para la comparación por pares son coherentes.

El primer paso para hallar la RC es multiplicar el valor de la primera columna de la matriz original (Tabla 3) por el vector de prioridad de la primera celda de la columna de vectores de prioridad (Tabla 5), y así sucesivamente para las demás columnas de la matriz original (Tabla 6).

VECTOR SUMA PONDERADO				
0.036	0.030	0.027	0.037	0.053
0.073	0.061	0.045	0.059	0.068
0.182	0.182	0.136	0.098	0.095
0.292	0.303	0.408	0.293	0.237
0.328	0.425	0.680	0.587	0.473

Tabla 6: Vector de suma ponderado

Posteriormente, se divide la suma total de vectores de suma ponderada (Tabla 7, columna 1) por el vector de priorización de cada fila (Tabla 5).

Columna 1	Columna 2
0.183	5.026569672
0.305	5.031353909
0.693	5.093082477
1.533	5.226059136
2.493	5.266288592

Tabla 7: Suma total de vectores de suma ponderada (columna 1) y su división por el vector de priorización (columna 2).

La suma del cálculo anterior (columna 2) dividido por el número de categorías con que se trabaja arroja un valor para el cálculo del Índice de Consistencia.

Suma	25.64335379
Suma/5	5.128670757

Para obtener el **Índice de Consistencia** se aplica la siguiente fórmula, que consiste en restar el valor anterior al número de categorías con que trabajamos, dividido entre el número de categorías con que trabajamos menos 1.

$$CI = \frac{\lambda_{Max} - n}{n - 1} = (5.13 - 5) / (5 - 1)$$

SI $RC > 0.1$; los juicios son inconsistentes.

SI $RC < 0.1$; se asume como consistente.

SI $RC = 0$; es consistente.

Finalmente, para obtener la **Razón de Consistencia**, se divide el Índice de Consistencia por el Índice Aleatorio, adquiriendo éste último índice un valor en función del número de criterios con que se trabaja.

$$RC = \frac{CI}{RI} = 0.032 / 1.115$$

(*) Para determinar el índice aleatorio que ayuda a determinar la relación de consistencia se emplea la tabla obtenida por Aguarón y Moreno, 2001. Donde "n" es el número de parámetros en la matriz.

n	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
IA	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

La Relación de Consistencia arroja un valor de 0.02, inferior a 0.1, por lo tanto los criterios empleados en la comparación por pares para jerarquizar los criterios que evaluamos son coherentes.

INDICE DE CONSISTENCIA	0.032167689
RELACIÓN DE CONSISTENCIA	0.028849946

Este proceso, aplicado para las categorías dentro de cada característica, así como a las características entre sí, para establecer un carácter ordinal entre ellos, lanza los siguientes valores de ponderación (Tablas 8, 10, 12, 14, 16 y 18).

Se pueden apreciar algunas diferencias entre los valores obtenidos mediante el AHP y los valores de ponderación que asigna CENEPRED, principalmente en la importancia que atribuye a las diferentes características de las viviendas, así como en el orden de prioridad que da a los materiales predominantes de construcción.

Respecto a qué características son más importantes para determinar la fragilidad de las viviendas frente a sismos, existe un cambio en los valores de ponderación, en tanto que en el presente estudio se ha querido dotar de un mayor peso a la pendiente sobre la que se encuentran asentados los edificios frente a la antigüedad de los mismos. El grado de inclinación del suelo se ha considerado de mayor importancia por su capacidad de amplificar las ondas sísmicas en las estructuras de los edificios.

PARAMETRO	PONDERACIÓN
Material de construcción	0.454
Estado de conservación	0.304
Número de pisos	0.137
Pendiente	0.083
Antigüedad	0.040

Tabla 8: Valores de ponderación obtenidos para las características de las viviendas.

PARÁMETRO	PONDERACIÓN
Material de construcción	0.386
Estado de conservación	0.386
Número de pisos	0.068
Pendiente	0.044
Antigüedad	0.111

Tabla 9: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para las características de las viviendas.

Sin duda, otro de los cambios más destacados introducidos respecto a la ponderación marcada por CENEPRED (Tabla 11) es el menor peso a la madera, material que presenta una menor fragilidad frente a un sismo por su capacidad de absorber las ondas y no sufrir daños si la estructura es sólida (Tabla 10). En los valores fijados por

CENEPRED es mucho más alto, puesto que ante eventos como tsunamis, huaycos (flujos de lodo y rocas con gran poder destructivo, muy comunes en el Perú) u otros fenómenos ambientales presenta una fragilidad elevada.

Material de Construcción	PESO PONDERADO
Estera o quincha	0.473
Adobe	0.293
Ladrillo	0.136
Concreto ⁽²⁾	0.061
Madera	0.036

Tabla 10: Valores de ponderación obtenidos para los materiales predominantes de construcción.

Material de Construcción	PESO PONDERADO
Estera o quincha	0.503
Adobe	0.134
Ladrillo	0.068
Concreto	0.035
Madera	0.260

Tabla 11: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para los materiales.

Si bien es cierto que la jerarquía de importancias de las categorías que diferencian el resto de las características de los edificios, como son el estado de conservación, el número de pisos, la pendiente y la antigüedad, se mantienen, se aprecian algunos cambios en las magnitudes de los valores de ponderación para las dos últimas variables citadas (Tablas 12 y 13).

Estado de Conservación	PESO PONDERADO
Muy Bueno	0.035
Bueno	0.068
Regular	0.134
Malo	0.260
Muy Malo	0.503

Tabla 12: Valores de ponderación obtenidos para los estados de conservación.

Estado de conservación	PESO PONDERADO
Muy bueno	0.035
Bueno	0.068
Regular	0.134
Malo	0.260
Muy malo	0.503

Tabla 13: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para los estados de conservación.

Número de Pisos	PESO PONDERADO
1	0.035
2	0.068
3	0.134
4	0.260
>= 5	0.503

Tabla 14: Valores de ponderación obtenidos para el número de pisos.

Número de pisos	PESO PONDERADO
1	0.035
2	0.068
3	0.134
4	0.260
>=5	0.503

Tabla 15: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para el número de pisos.

Pendiente	PESO PONDERADO
< 5 grados	0.062
10-20	0.099
20-30	0.161
25-45	0.262
> 45	0.416

Tabla 16: Valores de ponderación obtenidos para el grado de pendiente.

Pendiente	PESO PONDERADO
< 5 grados	0.035
10-20	0.068
20-30	0.134
25-45	0.260
> 45	0.503

Tabla 17: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para el grado de pendiente.

⁽²⁾ Concreto: referencia al hormigón armado muy empleada en América Latina.

Antigüedad	PESO PONDERADO
< 10 años	0.062
10-20	0.099
20-30	0.161
25-45	0.262
> 45	0.416

Tabla 18: Valores de ponderación obtenidos para el nivel de antigüedad.

Antigüedad	PESO PONDERADO
< 10 años	0.035
10-20	0.068
20-30	0.134
25-45	0.260
> 45	0.503

Tabla 19: Valores de ponderación establecidos por CENEPRED para el nivel de antigüedad.

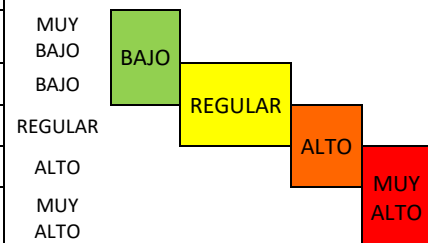
En definitiva, los cambios más significativos se ven reflejados en aquellas variables y parámetros evaluados, que no tienen ya el carácter ordinal que se introduce a través del método AHP. Estas discrepancias evidenciadas con respecto a los valores de ponderación sugeridos por CENEPRED se deben fundamentalmente a la manera genérica con que son valoradas estas variables para el conjunto de los riesgos naturales, y no haciendo hincapié en el ámbito sísmico que es donde se centra el presente estudio.

6.3.3. Cálculo del grado de vulnerabilidad

Trabajando como punto de partida con los datos de la base de datos generada anteriormente, y ponderándolos con los valores obtenidos mediante el proceso analítico jerárquico anterior, para darles la relevancia que tienen las diferentes características evaluadas en la determinación de la fragilidad, se calcula el grado de vulnerabilidad final de cada uno de los lotes sobre los que se dispone de información.

Se multiplica cada parámetro por el descriptor, es decir, el valor de la categoría concreta por el valor que determina la importancia de cada característica. Operación matemática que, aplicada para todas las variables, se suma para obtener el grado de vulnerabilidad por fragilidad del lote.

Material		Estado		Número de pisos		Pendiente		Antigüedad		FRAGILIDAD
Para.	Desc.	Para.	Desc.	Para.	Desc.	Para.	Desc.	Para.	Desc.	
0.454	0.036	0.304	0.035	0.137	0.035	0.083	0.062	0.040	0.062	0.018
0.454	0.061	0.304	0.068	0.137	0.068	0.083	0.099	0.040	0.099	0.056
0.454	0.136	0.304	0.134	0.137	0.134	0.083	0.161	0.040	0.161	0.112
0.454	0.293	0.304	0.260	0.137	0.260	0.083	0.262	0.040	0.262	0.226
0.454	0.473	0.304	0.503	0.137	0.503	0.083	0.416	0.040	0.416	0.462



*Para.- Parámetro: Cada una de las características evaluadas de las edificaciones.

*Desc.- Descriptor: Cada una de las categorías que se diferencian dentro de cada variable.

Tabla 20: Valores de ponderación finales para definir umbrales de fragilidad.

Entre los valores que marcan los umbrales de fragilidad muy baja, baja, regular, alta y muy alta se definen cuatro niveles de vulnerabilidad por fragilidad (Tabla 20), igual que determina CENEPRED. Son estas categorías las que se plasman cartográficamente.

7.- RESULTADOS

Los 1651 lotes estudiados del centro del área urbana de Huaral presentan características bien diferenciadas, ya que en ella se localiza la zona de casco antiguo, otra del “Huaral cuadrado” y una tercera del entorno del cerro de San Cristóbal.

7.1.- MATERIAL PREDOMINANTE

Considerando el material principal usado en la construcción, el factor que mayor peso tiene a la hora de estimar los daños que sufriría dicho edificio frente a un seísmo, predominan el ladrillo y el adobe como materiales más comunes. El 74% de los lotes evaluados tienen edificaciones de ladrillo (Figura 12), el 22% de adobe; mientras que, tan sólo el 3% corresponde a los restantes materiales. En la práctica se sabe que el hormigón tiene un comportamiento frente a un seísmo que apenas genera daños, en mientras que la madera sin estructura y la quincha y/o la estera sufren un colapso ya frente a bajas magnitudes.

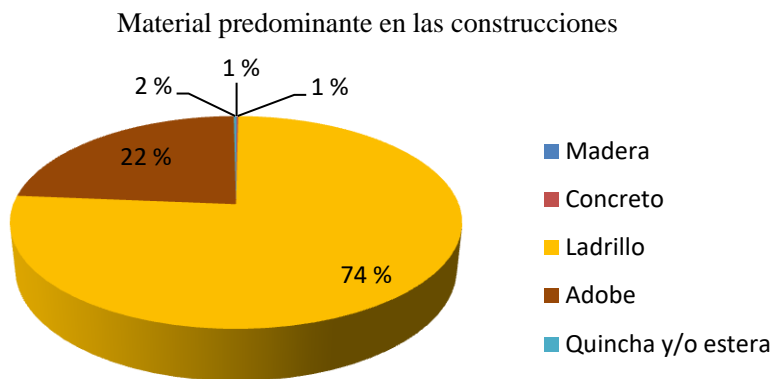


Figura 12: Predominancia de materiales en las construcciones.

Las construcciones de adobe son especialmente sensibles, ya que el barro es un material frágil, poco resistente, que se rompe fácilmente ante la acción de un seísmo (Imagen 6). En nuestra área de estudio se localizan en la parte más antigua de la ciudad, al sur de la Plaza de Armas (Figura 13).



Imagen 6: Construcción de adobe con grietas.



Figura 13: Mapa de material predominante en las edificaciones.

Por su parte, las construcciones de ladrillo presentan una mejor resistencia y capacidad estructural para absorber y disipar la energía que el seísmo otorga a la

edificación cuando se produce. Sin embargo, hay que diferenciar entre aquellos edificios que tienen una estructura confinada, que dota a la vivienda de una estabilidad mayor, de aquellos que simplemente presentan una superposición de ladrillos (Imagen 7). En el área de estudio es un material especialmente predominante en el “Huaral cuadrado”, la zona septentrional más nueva.



Imagen 7: Construcción de ladrillo afectada por humedad basal.

Respecto a los otros materiales, las edificaciones de quincha/estera (Imagen 8) se encuentran distribuidas de manera aislada en diferentes puntos de la ciudad, siendo unas construcciones especialmente vulnerables. Viviendas de hormigón están presentes en la parte rehabilitada del entorno de la Plaza de Armas. Finalmente, las construcciones de madera están presentes en el mercado “Galerías Paricio”, y que aunque la madera es un material con un comportamiento favorable frente a un seísmo, al no ser construcciones con cimientos ni elementos estructurantes existe el riesgo de colapso.



Imagen 8: Construcción de estera (izquierda) y construcción de madera y bambú (derecha).

7.2.- ESTADO DE CONSERVACIÓN

El estado de conservación es otra de las características a considerar en las edificaciones, ya que tiene mayor peso a la hora de evaluar la vulnerabilidad final de las construcciones. Se ha considerado la presencia de daños en la estructura, que comprometen la estabilidad, como agrietamientos, índices elevados de humedad, derrumbes parciales o instalaciones básicas deterioradas.

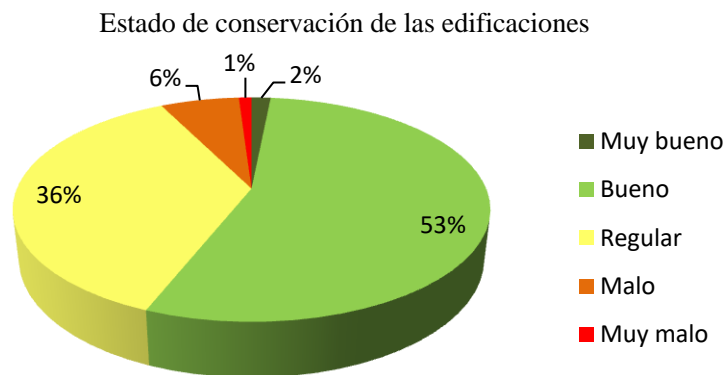


Figura 14: Estado de conservación de las edificaciones.

Tan sólo el 2% de las edificaciones tienen un estado de conservación muy bueno (Figura 14), el 53% de los lotes analizados tienen un estado de conservación bueno, el 36% regular, el 6% malo (Imagen 9) y algo menos del 1% muy malo (Imagen 10).



Imagen 9: Construcción en un estado de conservación malo.



Imagen 10: Construcción habitada en ruinas en el cerro de San Cristóbal.

Las construcciones en mejor estado de conservación se encuentran en la parte septentrional de la Plaza de Armas que ha sido rehabilitada, así como en la zona del entorno de los Parques de la Cultura y los Sueños (Figura 15).

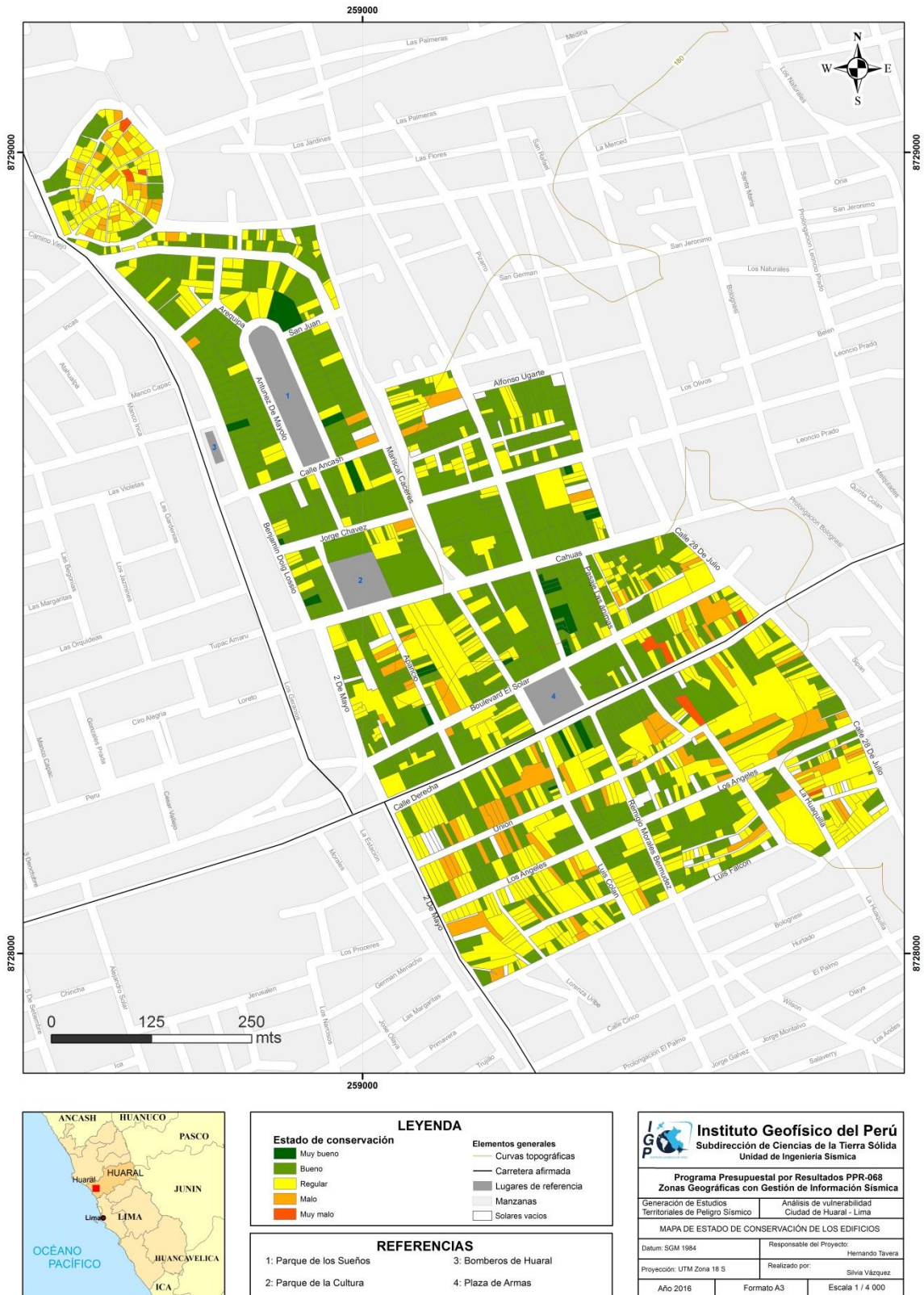


Figura 15: Mapa sobre el estado de conservación de los edificios.

7.3.- NÚMERO DE PISOS

Por otro lado, la elevación de los edificios condiciona su comportamiento frente a un sismo. Cuando se somete una construcción a un movimiento horizontal del terreno se generan fuerzas laterales, siendo mayores cuanto mayor número de pisos tenga el edificio. Los elementos estructurantes son los que transmiten las fuerzas y por tanto, deben tener una distribución adecuada. El problema se agrava con la mayoría de las viviendas de autoconstrucción que no cuentan con los elementos estructurantes de repartición de cargas; por lo tanto, su fragilidad aumenta exponencialmente.

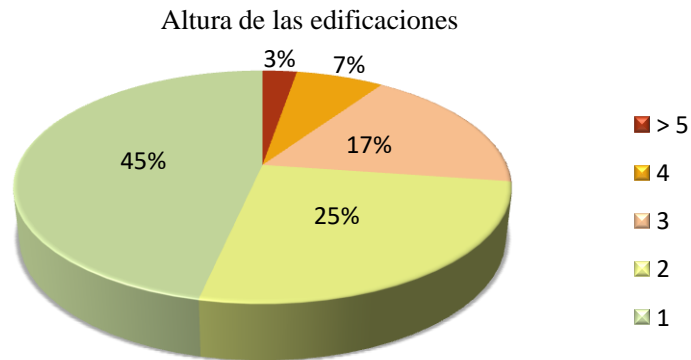
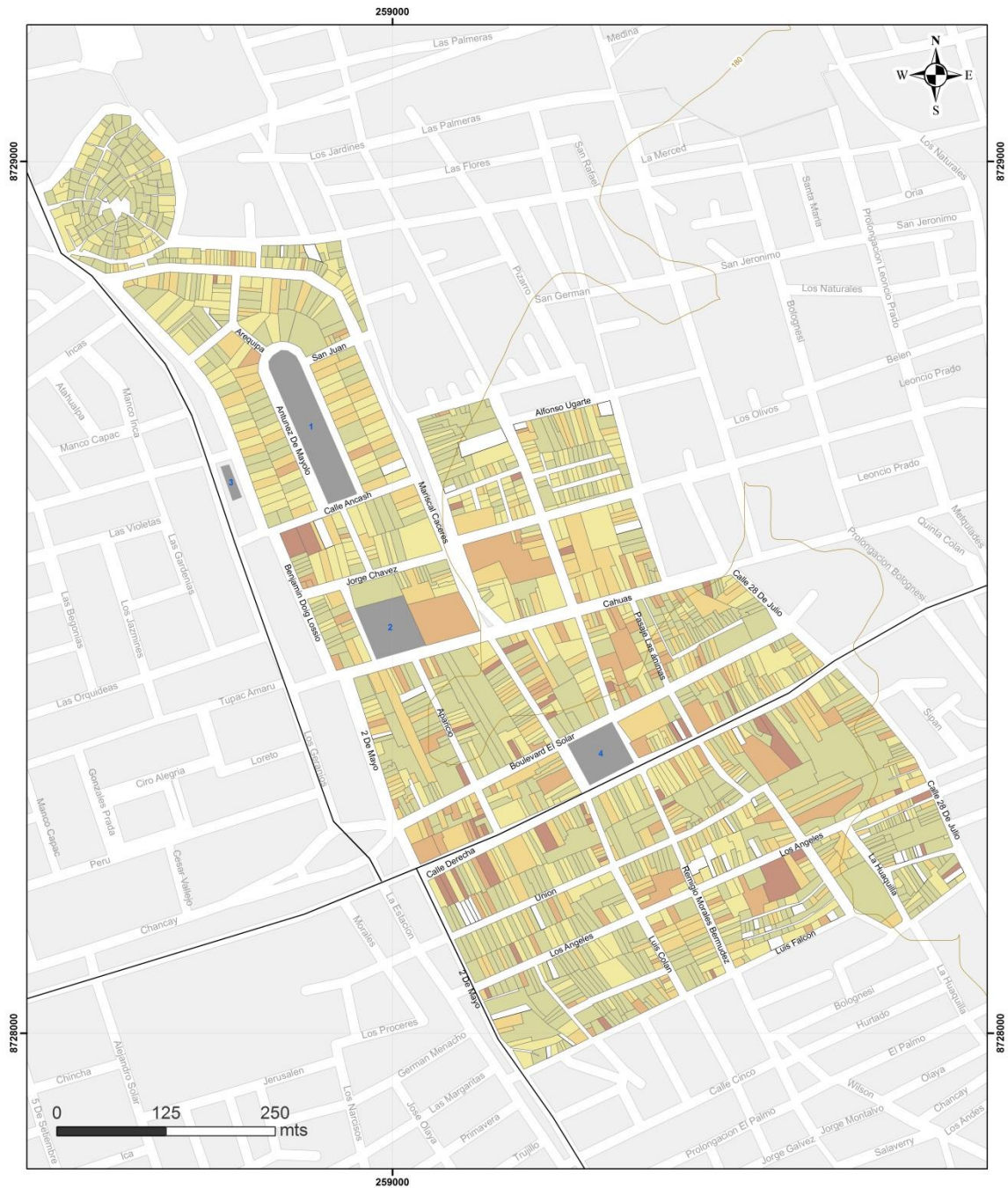


Figura 16: Distribución de la elevación de los edificios por número de pisos.

En la ciudad de Huaral predominan las construcciones de un piso, representando casi el 50 % de los lotes evaluados (Figura 16) y tan sólo, el 3% son edificios de entre 5 y 7 pisos.

Los inmuebles más elevados se encuentran en la parte central del área de estudio, es decir, la Plaza de Armas, siendo esta área donde los últimos años se ha llevado a cabo la elevación de estas construcciones (Figura 17).



LEYENDA	
Número de pisos	Elementos generales
1	Curvas topográficas
2	Carretera afirmada
3	Lugares de referencia
4	Manzanas
> 5	Solares vacíos
REFERENCIAS	
1: Parque de los Sueños	3: Bomberos de Huaral
2: Parque de la Cultura	4: Plaza de Armas

Instituto Geofísico del Perú Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida Unidad de Ingeniería Sísmica	
Programa Presupuestal por Resultados PPR-068 Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica	
Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico	Análisis de vulnerabilidad Ciudad de Huaral - Lima
MAPA SEGÚN EL NÚMERO DE PISOS DE LOS EDIFICIOS	
Datum: SGM 1984	Responsable del Proyecto: Hernando Tavera
Proyección: UTM Zona 18 S	Realizado por: Silvia Vázquez
Año 2016	Formato A3
Escala 1 / 4 000	

Figura 17: Mapa según la altura de las edificaciones.

7.4.- ANTIGÜEDAD

Otra de las características consideradas de las construcciones es su antigüedad. El tiempo útil de las viviendas es de 50 años; por lo tanto, todas aquellas que tengan una antigüedad superior van a presentar vulnerabilidad alta.

En nuestra área estudiada no existe una preponderancia de antigüedad de las viviendas, ya que existe un reparto equitativo de las mismas (Figura 18).

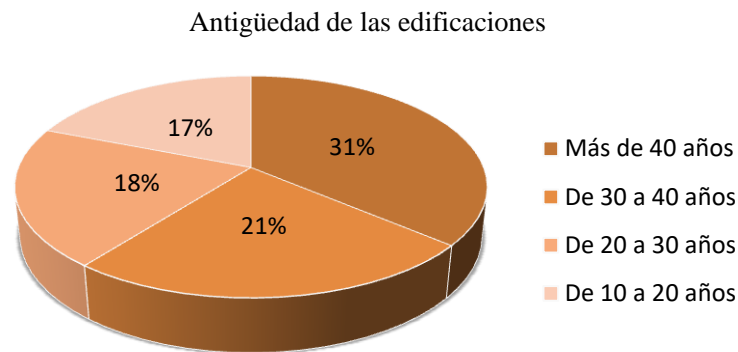


Figura 18: Distribución de la antigüedad de las construcciones.

Sin embargo, su distribución espacial está bien marcada. Mientras que las más antiguas se encuentran en la parte del casco histórico y en el centro neurálgico de la ciudad, las más nuevas se asientan más alejadas de esta zona, en dirección norte como parte de las urbanizaciones ubicadas entre las calles Benjamín Doig Lossio y Mariscal Cáceres (Figura 19).



LEYENDA	
Antigüedad	Elementos generales
De 5 a 10 años	Curvas topográficas
De 10 a 20 años	Carretera afirmada
De 20 a 30 años	Lugares de referencia
De 30 a 40 años	Manzanas
Más de 40 años	Solares vacíos
REFERENCIAS	
1: Parque de los Sueños	3: Bomberos de Huaral
2: Parque de la Cultura	4: Plaza de Armas

Instituto Geofísico del Perú Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida Unidad de Ingeniería Sísmica	
Programa Presupuestal por Resultados PPR-068 Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica	
Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico	Análisis de vulnerabilidad Ciudad de Huaral - Lima
MAPA SEGÚN LA ANTIGÜEDAD DE LAS CONSTRUCCIONES	
Datum: SGM 1984	Responsable del Proyecto: Hernando Tavera
Proyección: UTM Zona 18 S	Realizado por: Silvia Vázquez
Año 2016	Formato A3
Escala 1 / 4 000	

Figura 19: Mapa en función de la antigüedad de los lotes.

7.5.- PENDIENTE

Finalmente, para la estimación del grado de vulnerabilidad de cada uno de los lotes se ha tomado en cuenta la pendiente del terreno donde se asientan. Prácticamente la totalidad de la zona de estudio no presenta pendiente alguna; sin embargo, en el entorno del Cerro de San Cristóbal (Imagen 11) las construcciones salvan un desnivel de unos 20 metros, por lo que las pendientes han de ser consideradas (Figura 20).

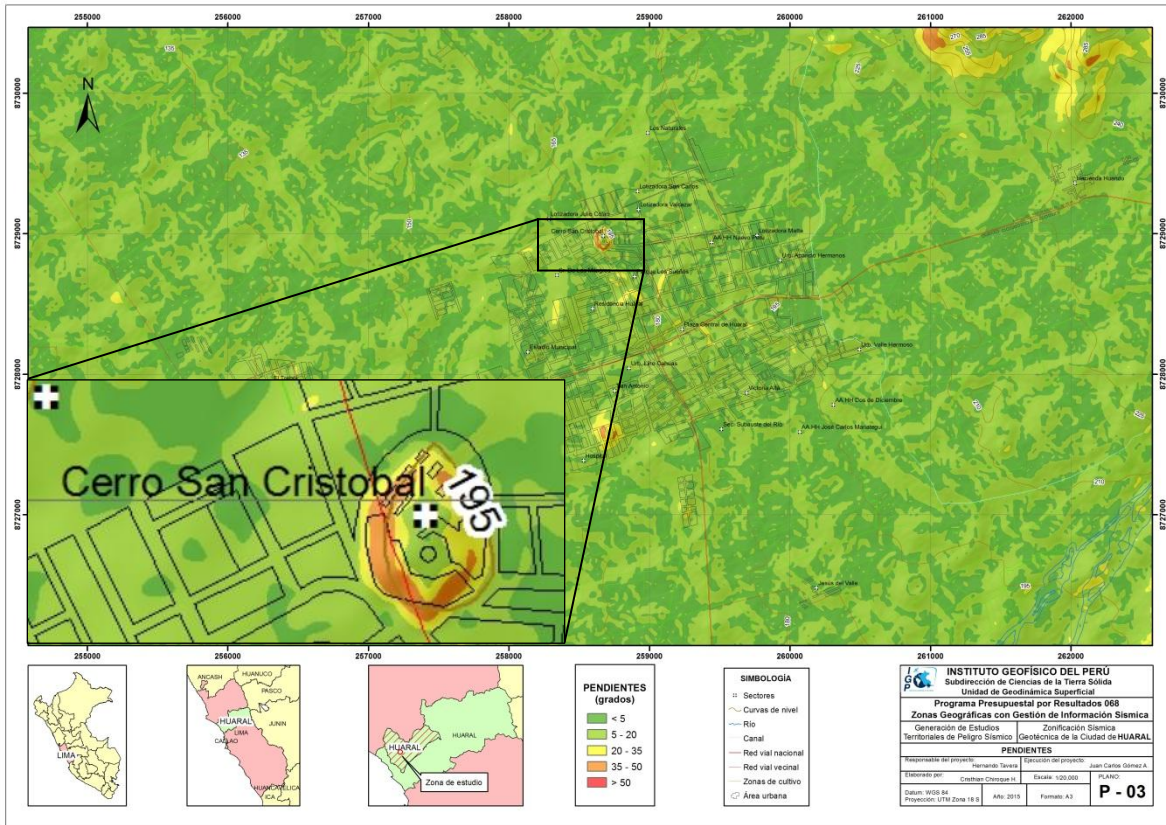


Figura 20: Mapa de pendientes para el área urbana de la ciudad de Huaral y su entorno.



Imagen 11: Vista general del cerro de San Cristóbal.



Imagen 12: Construcciones asentadas sobre una pendiente de en torno al 35° en el cerro de San Cristóbal.

7.6.- GRADO DE VULNERABILIDAD

Considerando las cinco características descritas anteriormente y asignándoles el peso que corresponde a cada una de ellas en función de cuánto influyen en el comportamiento de la construcción frente a un seísmo, se ha estimado el grado de vulnerabilidad.

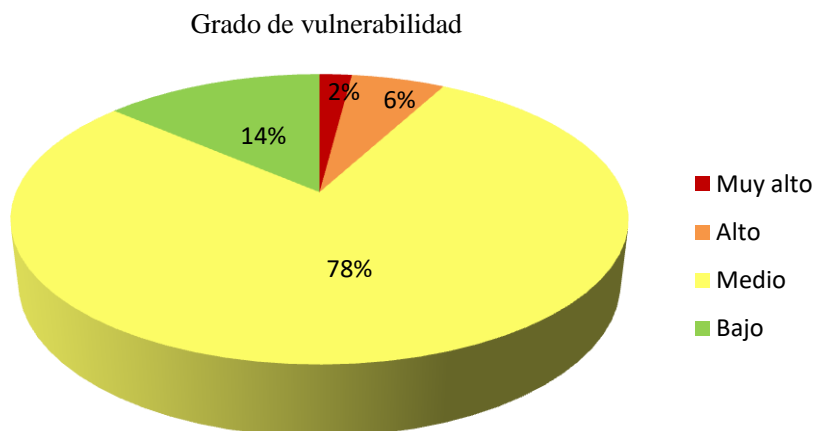


Figura 21: Distribución del grado de vulnerabilidad por lotes.

Los lotes de vulnerabilidad baja representan el 14% del total (Figura 21) y se caracterizan por ser construcciones de ladrillo confinado y presentar un buen estado de conservación, así como un número de pisos no superior a 2. Estos edificios presentarían un porcentaje de colapso de la construcción inferior al 20%, según CENEPRED.

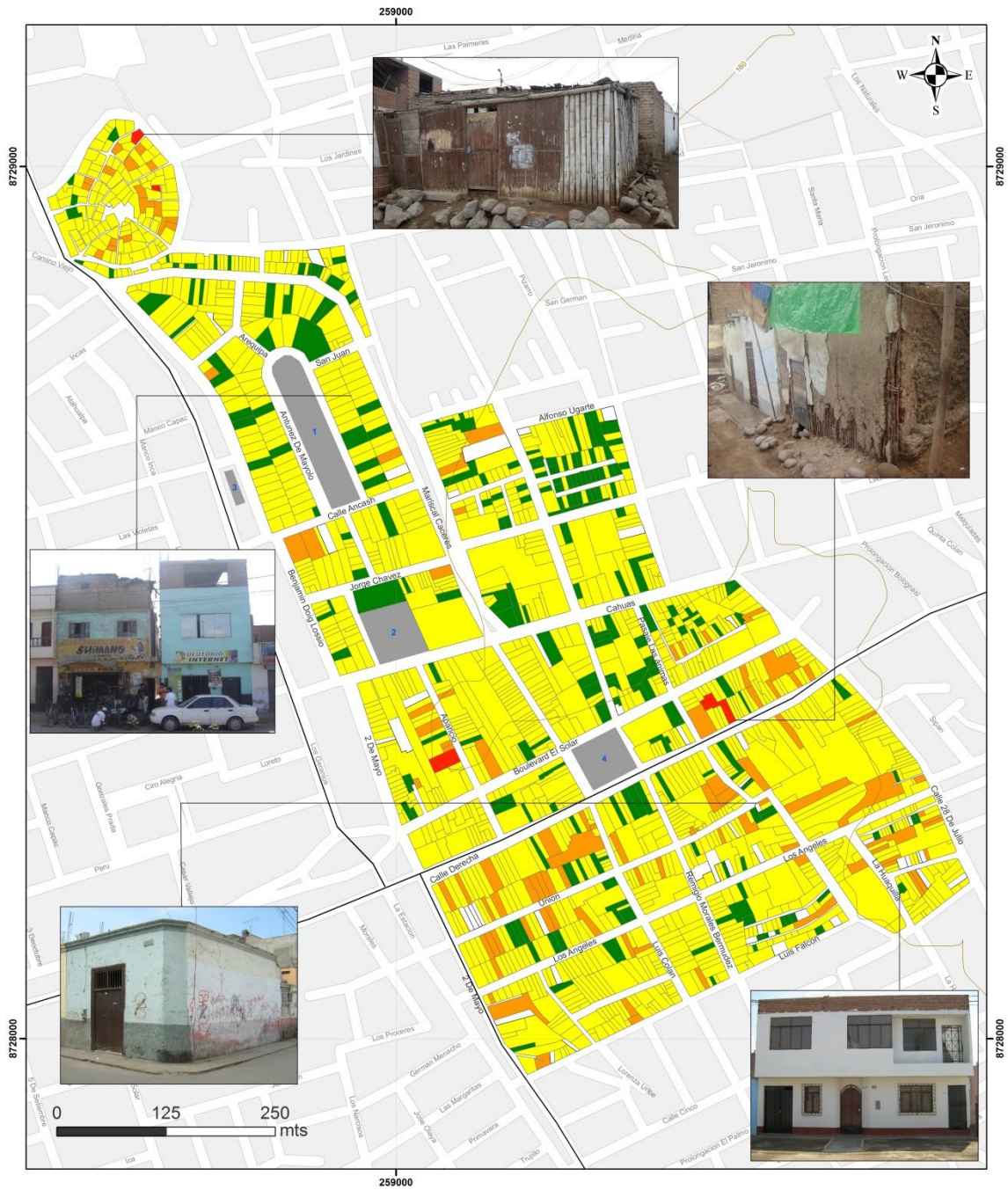
El 78% de los lotes del área de estudio presentan una vulnerabilidad media. Dentro de los mismos se engloban aquellas construcciones antiguas de un piso de adobe, material que actúa con poca resistencia frente a un seísmo, como ya se ha comentado anteriormente, así como edificios más nuevos, pero de más pisos, por lo que su vulnerabilidad se ve incrementada. Por esta diversidad de construcciones que engloba este umbral de vulnerabilidad, dicho porcentaje es tan elevado. A pesar de incluirse en el rango de vulnerabilidad media, estas edificaciones se verían colapsadas en torno a un 50% en caso de un seísmo de magnitud VIII (CENEPRED, 2014), y, por tanto, requieren actuaciones concretas para su mejora.

Los lotes con una vulnerabilidad alta (6%) son aquellas construcciones de adobe principalmente, y además con un estado de conservación malo. Estas viviendas alcanzarían un 80% de colapso en su conjunto edificado.

Tan sólo el 2% de las construcciones presentan un grado de vulnerabilidad muy alto. Son viviendas de materiales frágiles como la estera y/o quincha y la madera sin elementos estructurantes que la cohesionen, por lo que el grado de colapso sería del 100%, es decir, la vivienda quedaría completamente derrumbada. Este 2% equivale a 33 viviendas y teniendo en cuenta que el promedio de miembros de la familia peruana es de 3.7 (ENDES

-Encuesta Demográfica y de Salud Familiar, 2011), se estima que serían alrededor de 122 pérdidas de vidas humanas en caso de seísmo.

La distribución espacial de los lotes por grado de vulnerabilidad viene condicionada por la interacción de todas las características que se han descrito anteriormente. De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio (Figura 22), los lotes con una vulnerabilidad baja se encuentran distribuidos en la parte septentrional de la ciudad, mientras que aquellos con una vulnerabilidad alta se distribuyen principalmente en el sector meridional de la zona de estudio, a excepción del entorno del cerro de San Cristóbal situado en al Norte del área de estudio, correspondiendo a la parte más antigua y más nueva y/o rehabilitada respectivamente.



LEYENDA	
Grado de vulnerabilidad	Elementos generales
■ Bajo	— Curvas topográficas
■ Medio	— Carretera afirmada
■ Alto	— Lugares de referencia
■ Muy alto	■ Manzanas
	□ Solares vacíos
REFERENCIAS	
1: Parque de los Sueños	3: Bomberos de Huaral
2: Parque de la Cultura	4: Plaza de Armas

Instituto Geofísico del Perú Subdirección de Ciencias de la Tierra Sólida Unidad de Ingeniería Sísmica	
Programa Presupuestal por Resultados PPR-068 Zonas Geográficas con Gestión de Información Sísmica	
Generación de Estudios Territoriales de Peligro Sísmico	Análisis de vulnerabilidad Ciudad de Huaral - Lima
MAPA DE VULNERABILIDAD FRENTE A SISMOS	
Datum: SGM 1984	Responsable del Proyecto: Hernando Tavera
Proyección: UTM Zona 18 S	Realizado por: Silvia Vázquez
Año 2016	Formato A3
Escala 1 / 4 000	

Figura 22: Mapa final de vulnerabilidad de las construcciones.

8.- RECOMENDACIONES

Desde el Ayuntamiento de la ciudad de Huaral se deben tomar una serie de medidas para disminuir la vulnerabilidad física. Desde este estudio se plantean algunas recomendaciones a partir de lo que se ha podido apreciar de las construcciones que se encuentran en el entorno urbano del centro de la ciudad.

- Reforzamiento de las infraestructuras de los edificios ya construidos.
- Bonos de ayuda para realizar la transición del adobe a materiales sismorresistentes.
- Mejora de las viviendas, generalmente con base en capacitaciones y apoyo a los hogares para construir, reconstruir y reforzar mejor.
- Control de los métodos de construcción por parte de las autoridades municipales, garantizando el uso adecuado de los materiales de construcción, así como el diseño y construcción profesional de edificaciones.
- Poner a disposición de la Subgerencia de Defensa Civil y Gestión del Riesgo de Desastres del Ayuntamiento de la ciudad de Huaral la cartografía de vulnerabilidad por fragilidad como herramienta de gestión, instalando en el Centro de Operaciones de Emergencia de la región de Lima (ubicado en Huacho) la base de datos espacial, así como los resultados obtenidos, para facilitar la toma de decisiones en estados de riesgo sísmico.

9.- DISCUSIÓN

El primer desafío del proyecto ha sido la **búsqueda de equivalencias** de términos en lo referente a los componentes del riesgo. En Sudamérica los elementos que conforman el concepto de Riesgo se trabajan de manera diferente a como se realiza, principalmente, en Europa. En nuestro entorno los componentes del riesgo son peligrosidad, susceptibilidad y vulnerabilidad, mientras que en Perú se trabajaba solamente con peligrosidad y vulnerabilidad, incorporando la susceptibilidad a través del término 'exposición' como un componente de la vulnerabilidad (Figura 9).

El escaso tiempo en que se ha desarrollado el proyecto y el **largo periodo dedicado a la generación de la base de datos**, así como corrección de errores catastrales, ha imposibilitado la evaluación de otros parámetros que, sin duda, son interesantes para evaluar la vulnerabilidad en su conjunto.

Dentro del componente **fragilidad** se podrían haber valorado otras características también determinantes de las viviendas como la irregularidad de la planta en altura o la existencia de volados, que hacen a los edificios más frágiles en caso de sismo. Por otro lado, algunos componentes interesantes de la vulnerabilidad son la exposición (caracteriza el tipo de población que es susceptible de verse afectada, así como las infraestructuras básicas públicas) y la resiliencia (formación de la población para hacer frente y recuperarse tras un sismo de grandes magnitudes).

Sin embargo, el estudio tiene en cuenta y evalúa suficientes componentes, en tanto que se considera aquel factor que mayor peso tiene en la determinación de la vulnerabilidad, así como las características que se valoran son aquellas que en mayor medida marcan la fragilidad del edificio, posibilitando dictaminar en qué medida la vivienda se ve afectada por derrumbe.

Por otro lado, si bien es cierto que el proyecto se ajusta a una **metodología ya establecida por CENEPRED**, y cuyo uso es preceptivo para la elaboración de informes en Gestión del Riesgo de Desastres por parte de los órganos administrativos de la República del Perú, existen ciertos componentes del desarrollo metodológico que han sido adaptados al fenómeno natural que se estudia.

Se ha hecho uso de la **metodología AHP** para adecuar los valores de ponderación establecidos por CENEPRED, de manera que se ajusten a la realidad que experimentan las viviendas ante eventos sísmicos de elevada magnitud.

En cuanto a las **técnicas empleadas**, se ha empleado Google Street View para valorar diferentes características de las edificaciones del área de estudio. Una herramienta con muchas potencialidades para este tipo de estudios, ya que permite analizar diferentes zonas de riesgo sísmico sin necesidad de realizar trabajo de campo, lo que reduce enormemente los costes de los proyectos, pudiendo hacerlos extensibles a instituciones sin demasiado presupuesto.

Sin embargo, a pesar de tales beneficios, se trata de una herramienta que posibilita un trabajo manual, repetitivo y muy costoso en términos temporales. Si por el contrario se hubiese optado por la **teledetección**, esta técnica facilita el análisis de algunas características de las áreas urbanas de manera más eficiente, automática y rápida.

El grueso de los estudios de teledetección están orientados a trabajos que miden variables medioambientales, sin embargo progresivamente aparecen más publicaciones de evaluación de las características socioeconómicas del entorno urbano (Yang, 2011):

- Acceso a la energía eléctrica: Se estima el porcentaje de población con acceso a la red eléctrica mediante la luz nocturna detectada por el satélite. A raíz de ello se derivan otros indicadores usados para estimar parámetros socioeconómicos, como la distribución de la actividad económica, la población o las condiciones de vida.
- Estatus social en función del ratio de zonas verdes: Se establece una relación entre la vegetación, medida por el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) con datos derivados de las imágenes Landsat, e indicadores raciales y de estatus socioeconómico. El método de mínimos cuadrados y de regresión econométrica espacial demuestran que la vegetación vigorosa se asocia a la riqueza, aunque esta relación se explique en parte también por la morfología urbana.

Sin embargo, existe un condicionante que dificulta la implementación de las técnicas de tratamiento de imágenes satelitales en la determinación del grado de

vulnerabilidad por fragilidad, como es la **escala de trabajo**. Se pretendía hacer un estudio lote catastral a lote catastral, para poder determinar aquellos edificios concretos que necesitan actuaciones urgentes de reforzamiento. Ninguno de los estudios consultados para la realización de análisis socioeconómicos urbanos trabaja a una escala tan grande, siempre a nivel distrital o superior (Yang, 2011). Además se buscaba evaluar una serie de características concretas de las construcciones, que requieren trabajo a escala 1:1.

10.- CONCLUSIONES

Para la costa central de Perú donde se localiza la ciudad de Huaral se ha pronosticado (Tavera 2014) la ocurrencia de un seísmo de nivel VIII según la escala de intensidad de Mercalli (1999). Se trata de un seísmo mayor que provoca daños leves en estructuras sismorresistentes; considerables en edificios corrientes con colapso parcial; y grande en estructuras de construcción pobre, generando caída de chimeneas, columnas y separación de las paredes de la estructura (CENEPRED, 2014). De ahí la necesidad de realizar estudios de riesgo y sus componentes, concretamente de la vulnerabilidad de los edificios ante tal evento sísmico.

El **Mapa de Vulnerabilidad** frente a seísmos para la ciudad de Huaral ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

Casi un 10% del área urbana analizada se encuentra con un grado de vulnerabilidad alto y muy alto, por lo tanto se trata de construcciones que requieren actuaciones inminentes. Y dentro del 74% que engloba los lotes con una vulnerabilidad media habría que prestar especial atención a las antiguas construcciones de adobe (que supone el 78% dentro de este umbral de vulnerabilidad), por el inestable comportamiento que presentan en un escenario de riesgo sísmico, de las que previsiblemente colapsa el 50% de la edificación.

Este documento técnico debe ser empleado por las autoridades locales de la ciudad de Huaral para una mejor Gestión del Riesgo ante la ocurrencia de seísmos. Del mismo modo, para aportar las normas necesarias para el refuerzo de las edificaciones y mitigar los efectos secundarios que un seísmo puede ocasionar en los bienes materiales y humanos de la ciudad.

El presente estudio no evalúa la vulnerabilidad estructural de los edificios, que habría de hacerlo un ingeniero civil para cuantificar los daños, sino que determina el grado de vulnerabilidad por fragilidad, resolviendo si el edificio colapsa, y si lo hace total o parcialmente.

La **metodología se ha adaptado a la escala de trabajo** que requiere el análisis de cualquier componente del riesgo, ya que son características que precisan de **trabajo de campo**; una práctica ineludible cuando se trabaja a nivel urbano, en tanto que se pretende conocer el lote concreto que requiere intervención y actuaciones precisas.

Por su parte, los **Sistemas de Información Geográfica** se han evidenciado como una **herramienta para la resolución de un problema de índole ambiental con repercusión territorial**. Han permitido la incorporación de un proceso de cuantificación del criterio experto, asociado a datos espaciales.

A pesar de que el punto de partida era una metodología ya definida, se ha realizado un proceso de adecuación de la misma al fenómeno natural concreto que se estudiaba, para que los valores de ponderación fueran apropiados y los resultados coherentes. En un **equipo interdisciplinar** en el que el geógrafo ha agregado las herramientas de análisis espacial y la visión transversal para incorporar elementos socioeconómicos a un entorno de estudio, hasta el momento, exclusivamente geofísico. Así como se ha adquirido conocimientos técnicos en ingeniería civil para evaluar las características más influyentes en la respuesta del edificio frente a un sismo.

11.- BIBLIOGRAFÍA

- Barrios Corpa, J. et Al. (2014): *Consideraciones sobre el periodo de servicio de las estructuras en la normativa española*. Congreso latinoamericano REHABEND, 1-4 Abril, 2014, Santander, España.
- Castro Mendoza, R. (2014): *Evaluación del riesgo de desastres por peligros naturales y antrópicos del área urbana del distrito de Punta Hermosa*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- CENEPRED (2014): *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales-02da Versión*. Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.
- CISMID (Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres) (2005): *Estudio de vulnerabilidad y riesgo sísmico en 42 distritos de Lima y Callao*.
- Ho, W. et Al. (2006): Multiple criteria decision-making techniques in higher education. *International Journal of Education Management*, Vol. 20, 2:319-337.
- INDECI (Instituto Nacional de Defensa Civil) (2006): *Manual básico para la estimación del riesgo*. Lima-Perú.
- INDECI (2010): *Estudio para determinar el nivel de vulnerabilidad física ante la probable ocurrencia de un sismo de gran magnitud. Distrito: Chorrillos*. Instituto Nacional de Defensa Civil del Gobierno de Perú.
- INDECI – PNUD (2012): *Estudio integral del programa de ciudades sostenibles de la ciudad de Huaral*. Instituto Nacional de Defensa Civil del Perú y Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Maskrey, A. (1998): *La aplicación de los Sistemas de Información Geográfica al análisis del riesgo en América Latina*. Navegando entre brumas. Editorial La Red, Lima-Perú.
- Minke, G. (2005): *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Forschungslabor für Experimentelles Bauen. Universidad de Kassel, Alemania.
- Ochoa Zamalloa, A.J. (2012): *Aplicación de los Sistemas de Información Geográfica para la determinación de escenarios de riesgo en el balneario de Pucusana*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima.
- PREDES (Centro de Estudios y Prevención de Desastres) (2009): *Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima metropolitana y Callao, Perú*. Lima.

- Pacheco, F. & Contreras, E. (2008): *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). Santiago de Chile.
- López, O. A. (2014): *Guía para la evaluación de edificaciones existentes con fines de adecuación sísmica*. Serie Geópolis. Ingeniería sísmica. CAF - Banco de desarrollo de América Latina.
- Saaty, TL (1980): *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill International, New York.
- Saint-Michel, M. (2007-2008): *Analyse des enjeux et de la vulnérabilité au risque d'inondation du fleuve Charante: l'exemple de Saintes*. (ENGEES) Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg.
- Tavera H. (2008). *El Terremoto de Pisco (Perú) del 15 de agosto de 2007 (7.9Mw)*. Instituto Geofísico del Perú. Dirección de Sismología - CNDG. Lima. 486 pp.
- Tavera, H. et al. (2014): *Estimación del peligro sísmico para el Perú*. Subdirección de Ciencias de la tierra sólida, IGP.
- Tavera, H. et al. (2015): *Zonificación sísmica-geotécnica de la ciudad de Huaral. Programa presupuestal N°068: Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres*. Subdirección de Ciencias de la tierra sólida, Instituto Geofísico del Perú.
- Yang, X. (2011): *Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling In the Urban Environment*. John Wiley & Sons, Ltd. USA.
- Weng, Q. (2006): *Urban remote sensing*. CRC Press. Taylor & Francis Group. USA.

ANEXO

TABLAS DEL *ANALYTIC HIERARCHY PROCESS*

Tablas del AHP para las diferentes características evaluadas de los edificios

Matriz de comparación por pares

PARAMETRO	Mat. Constr.	Est. Conserv.	Núm. De Pisos	Antigüedad	Pendiente
Mat. Constr.	1.00	2.00	5.00	7.00	6.00
Est. Conserv.	1/2	1.00	4.00	6.00	5.00
Núm. De Pisos	1/5	1/4	1.00	5.00	3.00
Antigüedad	1/7	1/6	1/5	1.00	0.25
Pendiente	1/6	1/5	1/3	4.00	1.00
SUMA	2.010	3.417	10.200	23.000	15.250
1/SUMA	0.498	0.293	0.098	0.043	0.066

Matriz de normalización

PARAMETRO	Mat. Constr.	Est. Conserv.	Núm. De Pisos	Antigüedad	Pendiente
Mat. Constr.	0.498	0.585	0.490	0.304	0.393
Est. Conserv.	0.249	0.293	0.392	0.261	0.328
Núm. De Pisos	0.100	0.073	0.098	0.217	0.197
Antigüedad	0.071	0.049	0.020	0.043	0.016
Pendiente	0.083	0.059	0.033	0.174	0.066

Vector de priorización y peso ponderado

Vector Priorización	Peso ponderado
0.454	45.4
0.304	30.4
0.137	13.7
0.040	4.0
0.083	8.3

Vector de suma ponderado

VECTOR SUMA PONDERADO				
0.454	0.609	0.685	0.279	0.496
0.227	0.304	0.548	0.239	0.414
0.091	0.076	0.137	0.199	0.248
0.065	0.051	0.027	0.040	0.021
0.076	0.061	0.046	0.159	0.083

Índice y relación de consistencia

INDICE DE CONSISTENCIA	0.09842464
RELACIÓN DE CONSISTENCIA	0.08827322

Tablas del AHP para la variable estado de conservación

Matriz de comparación por pares

PARAMETRO	Muy Bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy Malo
Muy Bueno	1.00	0.33	0.20	0.14	0.11
Bueno	3	1.00	0.33	0.20	0.14
Regular	5	3	1.00	0.33	0.20
Malo	7	5	3	1.00	0.33
Muy Malo	9	7	5	3	1.00
SUMA	25.000	16.333	9.533	4.676	1.787
1/SUMA	0.040	0.061	0.105	0.214	0.560

Matriz de normalización

PARAMETRO	Muy Bueno	Bueno	Regular	Malo	Muy Malo
Muy Bueno	0.040	0.020	0.021	0.031	0.062
Bueno	0.120	0.061	0.035	0.043	0.080
Regular	0.200	0.184	0.105	0.071	0.112
Malo	0.280	0.306	0.315	0.214	0.187
Muy Malo	0.360	0.429	0.524	0.642	0.560

Vector de priorización y peso ponderado

Vector Priorización	Peso ponderado
0.035	3.5
0.068	6.8
0.134	13.4
0.260	26.0
0.503	50.3

Vector de suma ponderado

VECTOR SUMA PONDERADO				
0.035	0.023	0.027	0.037	0.056
0.104	0.068	0.045	0.052	0.072
0.174	0.203	0.134	0.087	0.101
0.244	0.339	0.403	0.260	0.168
0.313	0.474	0.672	0.781	0.503

Índice y relación de consistencia

INDICE DE CONSISTENCIA	0.060651729
RELACIÓN DE CONSISTENCIA	0.05439617

Tablas del AHP para la variable número de pisos

Matriz de comparación por pares

PARAMETRO	1	2	3	4	5
1	1.00	0.33	0.20	0.14	0.11
2	3	1.00	0.33	0.20	0.14
3	5	3	1.00	0.33	0.20
4	7	5	3	1.00	0.33
5	9	7	5	3	1.00
SUMA	25.000	16.333	9.533	4.676	1.781
1/SUMA	0.040	0.061	0.105	0.214	0.561

Matriz de normalización

PARAMETRO	1	2	3	4	5
1	0.040	0.020	0.021	0.031	0.062
2	0.120	0.061	0.035	0.043	0.079
3	0.200	0.184	0.105	0.071	0.112
4	0.280	0.306	0.315	0.214	0.185
5	0.360	0.429	0.524	0.642	0.561

Vector de priorización y peso ponderado

Vector Priorización	Peso ponderado
0.044	4.4
0.084	8.4
0.168	16.8
0.325	0.255
0.629	0.539

Vector de suma ponderado

VECTOR SUMA PONDERADO				
0.044	0.028	0.034	0.046	0.070
0.131	0.084	0.056	0.065	0.088
0.218	0.253	0.168	0.108	0.126
0.305	0.422	0.504	0.325	0.208
0.392	0.591	0.840	0.975	0.629

Índice y relación de consistencia

INDICE DE CONSISTENCIA	0.059220319
RELACIÓN DE CONSISTENCIA	0.053112394

Tablas del AHP para la variable antigüedad

Matriz de comparación por pares

PARAMETRO	1	2	3	4	5
1	1.00	0.33	0.20	0.14	0.11
2	3	1.00	0.33	0.20	0.14
3	5	3	1.00	0.33	0.20
4	7	5	3	1.00	0.33
5	9	7	5	3	1.00
SUMA	16.000	9.333	4.533	1.676	0.781
1/SUMA	0.063	0.107	0.221	0.597	1.280

Matriz de normalización

PARAMETRO	1	2	3	4	5
1	0.063	0.036	0.044	0.085	0.142
2	0.188	0.107	0.074	0.119	0.179
3	0.313	0.321	0.221	0.199	0.256
4	0.438	0.536	0.662	0.597	0.422
5	0.563	0.750	1.103	1.790	1.280

Vector de priorización y peso ponderado

Vector Priorización	Peso ponderado
0.057	5.7
0.122	12.2
0.263	26.3
0.558	0.554
1.051	1.231

Vector de suma ponderado

VECTOR SUMA PONDERADO				
0.057	0.041	0.053	0.080	0.117
0.171	0.122	0.088	0.112	0.147
0.284	0.366	0.263	0.186	0.210
0.398	0.609	0.790	0.558	0.347
0.512	0.853	1.317	1.674	1.051

Índice y relación de consistencia

INDICE DE CONSISTENCIA	0.064904171
RELACIÓN DE CONSISTENCIA	0.058210018

Tablas del AHP para la variable pendiente

Matriz de comparación por pares

PARAMETRO	1	2	3	4	5
1	1.00	0.33	0.20	0.14	0.11
2	3	1.00	0.33	0.20	0.14
3	5	3	1.00	0.33	0.20
4	7	5	3	1.00	0.33
5	9	7	5	3	1.00
SUMA	16.000	9.333	4.533	1.676	0.781
1/SUMA	0.063	0.107	0.221	0.597	1.280

Matriz de normalización

PARAMETRO	1	2	3	4	5
1	0.063	0.036	0.044	0.085	0.142
2	0.188	0.107	0.074	0.119	0.179
3	0.313	0.321	0.221	0.199	0.256
4	0.438	0.536	0.662	0.597	0.422
5	0.563	0.750	1.103	1.790	1.280

Vector de priorización y peso ponderado

Vector Priorización	Peso ponderado
0.057	5.7
0.122	12.2
0.263	26.3
0.558	0.554
1.051	1.231

Vector de suma ponderado

VECTOR SUMA PONDERADO				
0.057	0.041	0.053	0.080	0.117
0.171	0.122	0.088	0.112	0.147
0.284	0.366	0.263	0.186	0.210
0.398	0.609	0.790	0.558	0.347
0.512	0.853	1.317	1.674	1.051

Índice y relación de consistencia

INDICE DE CONSISTENCIA	0.064904171
RELACIÓN DE CONSISTENCIA	0.058210018

