



# **Estimación de la Amenaza y el Riesgo Probabilista por Huracán en Guatemala, Incorporando el Impacto Asociado al Cambio Climático**

**BID**

**Banco  
Interamericano de  
Desarrollo**

División de Medio  
Ambiente, Desarrollo  
Rural y Administración  
de Riesgos por  
Desastres

**NOTA TÉCNICA**  
# IDB-TN-667

**Agosto 2014**

# **Estimación de la Amenaza y el Riesgo Probabilista por Huracán en Guatemala, Incorporando el Impacto Asociado al Cambio Climático**

BID



**Banco Interamericano de Desarrollo**

**2014**

Catalogación en la fuente proporcionada por la  
Biblioteca Felipe Herrera del  
Banco Interamericano de Desarrollo

Estimación de la amenaza y el riesgo probabilista por huracán en Guatemala, incorporando el impacto asociado al cambio climático / Banco Interamericano de Desarrollo.

p. cm. — (Nota técnica del BID; 667)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Natural disasters—Prevention—Guatemala. 2. Natural disasters—Risk management—Guatemala. 3. Climatic changes—Guatemala. I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Medio Ambiente, Desarrollo Rural y Administración de Riesgos por Desastres. II. Título. III. Serie.  
IDB-TN-667

<http://www.iadb.org>

Las opiniones expresadas en esta publicación son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.

Se prohíbe el uso comercial no autorizado de los documentos del Banco, y tal podría castigarse de conformidad con las políticas del Banco y/o las legislaciones aplicables.

Copyright © 2014 Banco Interamericano de Desarrollo. Todos los derechos reservados; este documento puede reproducirse libremente para fines no comerciales.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. GENERALIDADES SOBRE LOS HURACANES Y LOS MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 TIEMPO ATMOSFÉRICO Y CLIMA.....</b>	<b>6</b>
<b>1.2 LOS HURACANES.....</b>	<b>7</b>
1.2.1 METEOROLOGÍA DE LOS HURACANES.....	7
1.2.2 CLIMATOLOGÍA DE LOS HURACANES.....	8
<b>1.3 LOS MODELOS METEOROLÓGICOS Y LOS MODELOS CLIMÁTICOS.....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 LOS HURACANES EN LOS MODELOS METEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS.....</b>	<b>15</b>
<b>2. EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA POR HURACÁN.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>20</b>
<b>2.2 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR HURACÁN PARA EL PERÍODO 1851-2010.....</b>	<b>20</b>
2.2.1 INFORMACIÓN EMPLEADA EN LA MODELACIÓN.....	20
2.2.2 PARÁMETROS DEL MODELO.....	33
2.2.3 CALIDAD DE LOS DATOS DISPONIBLES.....	38
2.2.4 MAPAS DE AMENAZA POR HURACÁN EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA.....	38
2.2.5 CURVAS DE AMENAZA.....	42
<b>2.3 EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR HURACÁN, TENIENDO EN CUENTA CAMBIO CLIMÁTICO, PARA EL PERÍODO 1851-2055.....</b>	<b>44</b>
2.3.1 INFORMACIÓN EMPLEADA EN LA MODELACIÓN.....	44
2.3.2 CALIDAD DE LOS DATOS DISPONIBLES.....	53
2.3.3 MAPAS DE AMENAZA POR HURACÁN EN LA REPÚBLICA DE GUATEMALA, TENIENDO EN CUENTA EFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	53
<b>3. COMPARACIÓN RESULTADOS AMENAZA POR HURACÁN PARA EL PERÍODO 1995 – 2005.....</b>	<b>59</b>
<b>4. COMPARACIÓN RESULTADOS AMENAZA POR HURACÁN PARA TODO EL PERIODO ESTUDIADO.....</b>	<b>66</b>
<b>5. PROXI DE EXPOSICIÓN A NIVEL NACIONAL.....</b>	<b>72</b>



<b>5.1 RESUMEN GENERAL DE INDICACIONES DE EXPOSICIÓN.....</b>	<b>72</b>
5.1.1 EDIFICACIONES URBANAS SEGÚN ÁREA CONSTRUIDA Y VALOR POR DEPARTAMENTOS Y GRUPOS DE USO.....	72
5.1.2 INFRAESTRUCTURA URBANA SEGÚN VALORES POR DEPARTAMENTOS Y SECTORES.....	78
5.1.3 INFRAESTRUCTURA NACIONAL SEGÚN VALORES POR DEPARTAMENTOS Y SECTORES.....	81
5.1.4 RESUMEN DE VALORES EXPUESTOS TOTALES POR DEPARTAMENTOS Y SECTORES.....	83
5.1.5 MAPAS DESCRIPTIVOS.....	86
<b>6. BASES DE EXPOSICIÓN DE POBLACIONES SELECCIONADAS.....</b>	<b>97</b>
6.1 MODELO DE EXPOSICIÓN PARA CIUDAD DE GUATEMALA.....	97
6.2 MODELO DE EXPOSICIÓN PARA OCÓS.....	103
6.3 MODELO DE EXPOSICIÓN PARA PUERTO BARRIOS.....	107
6.4 MODELO DE EXPOSICIÓN PARA SANTIAGO DE ATITLÁN.....	112
6.5 MODELO DE EXPOSICIÓN PARA LOS POCITOS.....	116
6.6 MODELO DE EXPOSICIÓN PARA ZACAPA.....	121
<b>7. TIPOS CONSTRUCTIVOS Y FUNCIONES DE VULNERABILIDAD.....</b>	<b>126</b>
7.1 CLASIFICACIÓN DE TIPOS CONSTRUCTIVOS PREDOMINANTES.....	126
7.2 TIPOS CONSTRUCTIVOS REPRESENTATIVOS.....	127
7.3 FUNCIONES DE VULNERABILIDAD.....	134
<b>8. PERFIL DE RIESGO CATASTRÓFICO POR HURACÁN SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>139</b>
<b>8.1 PÉRDIDAS TOTALES A NIVEL DE PAÍS.....</b>	<b>139</b>
<b>8.2 CONCENTRACIÓN DEL RIESGO POR HURACANES.....</b>	<b>142</b>
8.2.1 COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS POR DEPARTAMENTO.....	142
8.2.2 COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS POR SECTOR.....	149
8.2.3 PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA SECTORES PÚBLICO Y PRIVADO.....	151
8.2.4 PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL.....	152
<b>9. PERFIL DE RIESGO CATASTRÓFICO POR HURACÁN CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....</b>	<b>155</b>
<b>9.1 PÉRDIDAS TOTALES A NIVEL DE PAÍS.....</b>	<b>155</b>
<b>9.2 CONCENTRACIÓN DEL RIESGO POR HURACANES.....</b>	<b>158</b>
9.2.1 COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS POR DEPARTAMENTO.....	158

9.2.2	COMPARACIÓN DE PÉRDIDAS POR SECTOR.....	165
9.2.3	PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA SECTORES PÚBLICO Y PRIVADO.....	166
9.2.4	PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE PARA LA INFRAESTRUCTURA NACIONAL.....	168
<b>10.</b>	<b>COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL PERFIL DE RIESGO.....</b>	<b>171</b>
10.1	PÉRDIDA ANUAL ESPERADA Y PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE.....	171
10.2	PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR DEPARTAMENTO.....	172
10.3	PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR SECTOR.....	173
10.4	PÉRDIDA ANUAL ESPERADA POR SECTORES PÚBLICO Y PRIVADO.....	174
10.5	PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE POR DEPARTAMENTO.....	175
<b>11.</b>	<b>ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA.....</b>	<b>177</b>
11.1	RESULTADOS DE RIESGO POR VIENTO HURACANADO SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	178
11.2	RESULTADOS DE RIESGO POR VIENTO HURACANADO CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	181
11.3	MAPAS DE RIESGO.....	185
11.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	188
<b>12.</b>	<b>ANÁLISIS DE RIESGO PARA OCÓS.....</b>	<b>190</b>
12.1	RESULTADOS DE RIESGO POR VIENTO HURACANADO SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	191
12.2	RESULTADOS DE RIESGO POR VIENTO HURACANADO CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	194
12.3	MAPAS DE RIESGO.....	197
12.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	200
<b>13.</b>	<b>ANÁLISIS DE RIESGO PARA ZACAPA.....</b>	<b>202</b>
13.1	RESULTADOS DE RIESGO POR VIENTO HURACANADO SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	203
13.2	RESULTADOS PARA VIENTO HURACANADO CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	207
13.3	MAPAS DE RIESGO.....	210
13.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.....	214
<b>14.</b>	<b>ANÁLISIS DE RIESGO PARA SANTIAGO DE ATITLÁN.....</b>	<b>216</b>

14.1	RESULTADOS PARA VIENTO HURACANADO SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO	217
14.2	RESULTADOS PARA VIENTO HURACANADO CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO	220
14.3	MAPAS DE RIESGO	222
14.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	225
<b>15.</b>	<b>ANÁLISIS DE RIESGO PARA LOS POCITOS</b>	<b>227</b>
15.1	RESULTADOS PARA VIENTO HURACANADO SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO	228
15.2	RESULTADOS PARA VIENTO HURACANADO CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO	231
15.3	MAPAS DE RIESGO	235
15.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	237
<b>16.</b>	<b>ANÁLISIS DE RIESGO PARA PUERTO BARRIOS</b>	<b>239</b>
16.1	RESULTADOS PARA VIENTO HURACANADO SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO	240
16.2	RESULTADOS PARA VIENTO HURACANADO CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO	243
16.3	MAPAS DE RIESGO	246
16.4	COMPARACIÓN DE RESULTADOS	249
<b>17.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>251</b>
17.1	ACERCA DE LA MODELACIÓN DE LA AMENAZA	251
17.2	ACERCA DE LAS BASES DE EXPOSICIÓN	252
17.3	ACERCA DE LA VULNERABILIDAD	253
17.4	ACERCA DEL PERFIL DE RIESGO CATASTRÓFICO	253
17.5	ACERCA DEL ANÁLISIS DE RIESGO EN POBLACIONES SELECCIONADAS	255
<b>18.</b>	<b>REFERENCIAS</b>	<b>260</b>

## **ANEXO 1. MODELO DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR VIENTOS HURACANADOS**

### **INTRODUCCIÓN**

### **PROCEDIMIENTO GENERAL**

### **SIMULACIÓN DE HURACANES**

### **MODELACIÓN DEL VIENTO**

## **ANEXO 2. PROXI DE EXPOSICIÓN DE GUATEMALA**

## **ANEXO 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PROBABILISTA DEL RIESGO**

### **GENERALIDADES**

### **ANÁLISIS DEL RIESGO**

## **ANEXO 4. PÉRDIDAS POR SECTOR Y POR DEPARTAMENTO PARA GUATEMALA SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO**

## **ANEXO 5. PÉRDIDAS POR DEPARTAMENTO Y POR SECTOR PARA GUATEMALA CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO**

## **ANEXO 6. DATASET DE INFORMACIÓN DE GUATEMALA**

## ABSTRACTO<sup>1</sup>

El estudio consiste en un análisis probabilista del riesgo de huracanes considerando los efectos del cambio climático. En el estudio se comparan los resultados de pérdidas esperadas en infraestructura pública y privada causadas por huracanes, considerando escenarios de cambio climático. La simulación de huracanes futuros fue preparada por el National Center for Atmospheric Research (NCAR) dentro del marco de la Cooperación Técnica Modelaje del Cambio Climático en Latinoamérica y el Caribe (RG-T1574). Para el estudio, NCAR generó una simulación de huracanes futuros, aplicando el escenario de Cambio Climático A2 del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC). Para el cálculo del riesgo de desastre de huracán se utilizó la plataforma de cómputo “Comprehensive Approach for Probabilistic Risk Assessment” (CAPRA), desarrollada por el BID, Banco Mundial, Naciones Unidas-EIRD y CEPREDENAC.

El estudio analiza el posible impacto de huracanes con diferentes periodos de recurrencia, desde 50 años hasta 1000 años. Además de los valores para el conjunto del país, el estudio efectúa análisis específicos de la Ciudad de Guatemala, Ocós, Zacapa, Santiago de Atitlán, Los Pocitos y Puerto Barrios. Así mismo, cada ciudad fue analizada en base al departamento, sector, sistema estructural, uso, categoría y nivel socioeconómico de la infraestructura.

Conforme a este estudio, el valor expuesto de la infraestructura de Guatemala calculada es aproximadamente de US\$99,017 millones. Con esta base se estima que Guatemala podría perder hasta un máximo de US\$ 4,644 millones (4.7% del valor expuesto) como consecuencia de un huracán asociado a un periodo de recurrencia de 100 años (i.e. 10% de probabilidad de ocurrir en los próximos 10 años). En un escenario de cambio climático, dichas pérdidas podrían ascender a US\$6,114 millones (aumento de 32%).

El estudio proyecta que en la zona interior de Guatemala la máxima velocidad de los vientos bajo el efecto del cambio climático al año 2055 aumentará entre el 20% al 40%, produciendo un aumento en la pérdida anual esperada (PAE) por vientos huracanados del 64% a 102%, mientras que en las zonas costeras del litoral Caribe los vientos aumentarán un 5%, con aumentos de la PAE del orden del 40%.

### **JEL Código:** Q54

**Palabras Claves:** Estimación; Amenaza; Riesgo; Huracán; Impacto; Cambio Climático, Guatemala.

---

<sup>1</sup> Los autores son Sergio Lacambra, Especialista Líder en Gestión de Riesgos de Desastres del Departamento de Infraestructura y Medio Ambiente del BID (INE/RND), Tsuneki Hori, Especialista en Gestión de Riesgos de Desastres (INE/RND), Alfred Hans Grunwaldt, Especialista Senior de Cambio Climático (INE/CCS) y Maricarmen Esquivel Gallegos, Asociada Senior de Cambio Climático (INE/CCS). Los autores, además desean agradecer a: Omar Darío Cardona, el Director de Proyecto del Consorcio *Evaluación de Riesgos Naturales* (ERN) América Latina; Luis E. Yamín; Mario G. Miguel Mora y Gabriel Bernal. Adicionalmente, los autores desean expresar su especial reconocimiento al Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (CONRED) de Guatemala por sus importantes comentarios durante el taller de difusión en febrero 2013, así como a Yolanda Valle (INE/RND) por su asistencia técnica en la publicación de la presente nota técnica.

## INTRODUCCIÓN

En general se puede reconocer, con algunas excepciones, que existe limitada información histórica acerca de los eventos catastróficos que han ocurrido o, peor aún, que pueden ocurrir en un país. Se puede afirmar en la mayoría de los casos que los eventos más graves que pueden presentarse no han ocurrido todavía. Por esta razón, no es posible pronosticar las futuras consecuencias por eventos extremos con base en la información disponible de efectos que han ocurrido históricamente.

Considerando la posibilidad de que se pueden presentar eventos futuros altamente destructivos, la estimación del riesgo debe abordarse mediante la utilización de modelos analíticos probabilistas, que permitan emplear la información disponible para predecir posibles consecuencias catastróficas. La evaluación del riesgo por eventos extremos debe seguir un enfoque prospectivo, anticipando eventos de ocurrencia y consecuencias científicamente factibles que puedan presentarse en el futuro, considerando las grandes incertidumbres asociadas a la estimación de su severidad y frecuencia de ocurrencia.

De acuerdo a lo anterior, el Gobierno de Guatemala, a través de la Secretaría Ejecutiva de la Coordinadora Nacional para la Reducción de Desastres (SE-CONRED), implementa el proyecto Fortalecimiento de Capacidades para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres en Guatemala (FC-GIRD). El proyecto apoya al Gobierno Nacional en el fortalecimiento de la gestión del riesgo de desastres mediante la inclusión del contexto de adaptación al Cambio Climático en la planificación y diseño de la inversión pública. El proyecto es financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) a través del convenio de donación ATN/OC-12499-GU, aprobado por el Gobierno de Guatemala mediante acuerdo gubernativo número 445-2011, publicado en el diario oficial del 8 de diciembre de 2011. La presente consultoría se desarrolla a través del Componente (II) del proyecto Fortalecimiento de capacidades para la gestión del riesgo de desastres. Para avanzar en esta actividad y hacer la estimación del riesgo de desastres se considera el escenario de cambio climático SRES A1B en la evaluación de la amenaza por ciclones tropicales en la plataforma CAPRA.

Este informe presenta los resultados finales de la consultoría de análisis de riesgo en Guatemala, incorporando los efectos asociados al cambio climático. Se emplean para tal fin las modelaciones de amenaza por vientos huracanados basadas en trayectorias históricas y en simulaciones de trayectorias futuras calculadas por NCAR. Se emplean también las bases de exposición levantadas por el consultor de manera independiente a este proyecto, así como las funciones de vulnerabilidad seleccionadas con base en el criterio y la experiencia del consultor.

La amenaza por vientos huracanados se calculó incorporando trayectorias futuras simuladas correspondientes a posibles ciclones en la cuenca del Atlántico Norte. Se determinó la amenaza punto a punto en el territorio de Guatemala, calculada con información de eventos históricos y futuros. Las trayectorias futuras fueron calculadas por NCAR (National Center for Atmospheric Research, en Boulder, EE.UU), en el marco del Convenio de Cooperación Técnica RG-T1574: Modelaje del Cambio Climático en Latinoamérica y el Caribe con el BID.

Con el fin de realizar la modelación de la amenaza por vientos huracanados para Guatemala, incorporando el efecto del cambio climático, se recurrió a las simulaciones de posibles trayectorias futuras generadas por NCAR, para la cuenca del Atlántico Norte, empleando el modelo NCRM (Nested Regional Climate Model), con una malla anidada de resolución 12X12 Km. Dichas trayectorias fueron simuladas para las décadas de 1995-2005 (década de control), 2020-2030 y 2045-2055. Los periodos vacíos fueron completados por el grupo consultor haciendo uso de técnicas estadísticas basadas en proyecciones de la variabilidad multidecadal del Atlántico Norte (AMO por sus siglas en inglés Atlantic Multi-decadal Oscillation), la cual es una variabilidad climática natural que se manifiesta como una variación oscilante en el tiempo de la temperatura de la superficie oceánica.

El grupo consultor es consciente que la mayor afectación real en la república de Guatemala por cuenta de la ocurrencia de ciclones tropicales, corresponde a la desestabilización de los procesos hidrometeorológicos y no al impacto directo de los huracanes. No obstante, con el fin de mejorar las capacidades técnicas y operativas de las instituciones nacionales de planificación y gestión del riesgo en el uso de la Plataforma CAPRA, así como de realizar la estimación del riesgo de desastres considerando el escenario de cambio climático SRES A1B en la evaluación de la

amenaza, las instituciones encargadas de la formulación de este proyecto de consultoría optaron por realizar la evaluación para vientos huracanados.

En general, los resultados obtenidos indican un aumento en la amenaza para todas las regiones del país. Esto debe entenderse como el resultado de una simulación basada en un escenario de emisiones definido, y siguiendo tendencias dadas por expertos en modelación climática (NCAR) acerca de la probable actividad ciclónica en el océano Atlántico. Los resultados de la evaluación de amenaza se presentan en términos de mapas de velocidad máxima del viento para diferentes periodos de retorno en todo el territorio guatemalteco, así como en términos de curvas de amenaza (intensidad máxima probable) para las principales ciudades del país.

La actividad 3.3 del Plan de Trabajo de este proyecto de consultoría indica que, durante su ejecución, la SE-CONRED estará dando iniciativa para recopilar los datos necesarios para la definición de los elementos expuestos a la amenaza por vientos huracanados, mediante la contratación de otro equipo de trabajo en una consultoría independiente, que se estará realizando en paralelo a la presente consultoría, sobre el levantamiento de información y actualización de las bases de datos de infraestructura crítica de algunos municipios seleccionados, con el fin de enriquecer la base de información y mejorar la estimación del riesgo.

Por razones ajenas a esta consultoría, para el momento en que de acuerdo con los cronogramas establecidos, se debía realizar el análisis de riesgo, las bases de exposición de infraestructura crítica no se encontraban listas a un nivel mínimo que permitiera su implementación en dicho análisis. Por tal motivo, se decidió de común acuerdo con la SE-CONRED y con el representante local del BID, avanzar en el cálculo del riesgo establecido para la presente consultoría con el uso de bases de exposición levantadas por el consultor en Guatemala, como parte del proyecto CAPRA-Guatemala, finalizado en 2010 y financiado por el BID. Estas bases corresponden a lo siguiente: un proxi de exposición a nivel nacional para Guatemala; un levantamiento a nivel de zonas homogéneas para la Ciudad de Guatemala; y 5 levantamientos a nivel de manzanas o predios para las ciudades de Puerto Barrios, Ocos, Los Pocitos, Zacapa y Santiago de Atitlán. El uso de estas bases de exposición permite establecer el nivel de afectación esperado, en términos de pérdidas económicas, por el impacto del cambio climático en Guatemala y permite de esta



manera establecer las conclusiones esperadas del estudio, cumpliendo con el alcance establecido originalmente.

Los resultados aquí presentados deben entenderse como órdenes de magnitud de las pérdidas esperadas por la ocurrencia natural de ciclones tropicales en la cuenca del océano Atlántico Norte, así como por el incremento en su frecuencia e intensidad por cuenta del cambio climático. Estos resultados son calculados empleando una metodología de cálculo probabilista de riesgo que involucra de manera rigurosa la incertidumbre asociada a la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, y son presentados en términos de estimadores puntuales de riesgo comúnmente empleados en la industria aseguradora.

**Nota importante:**

Los resultados aquí presentados fueron generados haciendo uso de la mejor información disponible durante la ejecución del proyecto. Al momento de la entrega final de resultados, se comunicó al grupo consultor acerca de la existencia de información básica de mejor calidad a la empleada. Esto hace referencia específicamente a la capa de topografía y de localización de áreas urbanas de Guatemala. Se acordó con la contraparte SE-CONRED el reprocesamiento de la amenaza por vientos huracanados a nivel nacional, haciendo uso de esta nueva información disponible, fuera del alcance contractual de este proyecto, y una vez esta información sea entregada al grupo consultor. Adicionalmente, y como valor agregado a esta entrega, el grupo consultor se compromete a calcular la amenaza incluyendo el impacto asociado al cambio climático, hasta el año 2032, según lo requerido para el proceso de formulación del plan nacional de desarrollo de Guatemala.

## **1. GENERALIDADES SOBRE LOS HURACANES Y LOS MODELOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**

El cambio climático que está ocurriendo y que, según diversos informes de expertos científicos (ver IPCC, 2007), se hará más marcado en la medida como se avance en el transcurso del siglo XXI, modificará las características (frecuencia, intensidad, duración, lugar de ocurrencia, períodos del año en el que se observan, entre otros) de los fenómenos meteorológicos extremos, que en reiteradas ocasiones se constituyen como causa de desastres en diferentes regiones del planeta. De ahí que desde el punto de vista práctico en la gestión del riesgo se preste especial atención a los cambios que puedan ocurrir en los patrones espacio-temporales de este tipo de fenómenos.

Uno de los fenómenos meteorológicos sobre los cuales se ha centrado la atención por ser una causa recurrente de desastres para diferentes países, son los ciclones tropicales (depresiones tropicales, tormentas tropicales y huracanes), particularmente la fase más intensa de su desarrollo: los huracanes. En la gestión de riesgo es importante conocer qué podría pasar en el futuro con la intensidad, la frecuencia, la trayectoria, la velocidad de desplazamiento de estos sistemas bajo condiciones climáticas modificadas. En la búsqueda de una respuesta a la pregunta sobre las características de los huracanes en el futuro se dispone de dos aproximaciones:

- Estimar los posibles cambios con base en el análisis de lo ocurrido en el pasado utilizando diversas herramientas estadísticas y de probabilidades;
- Simular, con base en modelos numéricos que reproducen gran parte de los elementos del sistema climático, el comportamiento de la atmósfera que se observaría bajo condiciones supuestas (escenarios) muy probables en el futuro y analizar el comportamiento de los huracanes en ese clima simulado.

Las dos aproximaciones tienen una relación muy estrecha. La capacidad de los modelos de representar los huracanes se mide a través de la comparación con lo ocurrido en el pasado. Igualmente, para el análisis de la información generada por los modelos sobre los huracanes en el futuro, se utilizan herramientas propias de la estadística y teoría de probabilidad.

Este capítulo se centrará principalmente en cómo están representados los huracanes en los modelos meteorológicos y en los modelos climáticos. Pero antes de abarcar este tema específico, es conveniente retomar conceptos básicos de meteorología y climatología que, si bien están estrechamente relacionados, tienen diferencias muy importantes al momento de interpretar o comprender los resultados de diferentes modelos numéricos (ya sea meteorológico o climático) sobre los ciclones tropicales, en especial sobre los huracanes.

## **1.1 Tiempo atmosférico y clima**

El *tiempo atmosférico* (en adelante se mencionará solo el *tiempo*) es el estado de la atmósfera en un *momento determinado* y se expresa en la variedad de fenómenos meteorológicos (determinada temperatura o humedad del aire, calma o viento, lluvia, niebla, tormenta, etc.) que se observan hora a hora o día a día el cual es el resultado de la dinámica atmosférica. El *clima* por su parte comprende las condiciones atmosféricas predominantes durante un período dado (meses, años, siglos, miles de años), las cuales son el resultado no sólo de la dinámica atmosférica sino de la interacción entre la atmósfera, la hidrósfera (el océano, principalmente), la biósfera, la litósfera y la antropósfera. Así, la atmósfera y el tiempo atmosférico son el objeto de estudio de la meteorología, en tanto que del clima y su dinámica se ocupa la climatología. Obviamente, hay una relación muy estrecha entre estos dos conceptos y entre estas dos ciencias de La Tierra.

En este contexto, los huracanes son fenómenos meteorológicos extremos en la medida como los procesos asociados a ellos están en la escala de horas-días. La meteorología se ocupa de la dinámica atmosférica que conlleva a la formación y desarrollo de estos sistemas y estudia su intensidad, duración, trayectoria y velocidad de desplazamiento, todo ello con miras a mejorar el pronóstico de su formación y evolución para apoyar a los sistemas de alerta y prevención de desastres. Por su parte, el clima (las condiciones atmosféricas predominantes durante un período) define características como la distribución geográfica de estos fenómenos, la época del año durante las que se observan, la frecuencia de los mismos, la trayectoria predominante (o media), la velocidad promedio de desplazamiento; por ello, la climatología, en cuanto a ciclones tropicales y huracanes se refiere, debe ocuparse de estas últimas características.

Ahora bien, las condiciones climáticas no son constantes: varían de año en año o se modifican en el largo plazo. Así, se observan algunos años más cálidos que lo normal (que el “promedio”) o relativamente fríos, más lluviosos o con escasa precipitación. Esta secuencia de anomalías conforma ciclos expresados en fluctuaciones de las variables climatológicas alrededor de una norma (generalmente el promedio o, para los fenómenos extremos, una frecuencia determinada) que se conoce como *variabilidad climática*. La modificación de la norma alrededor de la cual ocurren las oscilaciones, es decir la modificación de las condiciones predominantes, se conoce como *cambio climático*.

Tanto las fases extremas de la variabilidad climática como el cambio climático tienen efecto en las características (meteorológicas y climatológicas) de los fenómenos extremos como los huracanes. Hay evidencias, por ejemplo, que en años en los que se observan aguas superficiales anormalmente frías en el Pacífico tropical oriental (fenómeno La Niña) hay más frecuencia de huracanes en el Atlántico tropical, Mar Caribe y Golfo de México, mientras que en años con anomalías cálidas (fenómeno El Niño), se presenta un menor número de huracanes en ese sector del Atlántico y Caribe (ver por ejemplo Amador, et al., 2010). No hay duda de que el cambio climático que está ocurriendo tendrá algún efecto en los patrones espacio-temporales que regulan los huracanes, sin embargo aún hay debate acerca de tales cambios, situación que se analizará más adelante.

## **1.2 Los huracanes**

Un huracán es la fase máxima de desarrollo de un ciclón tropical. Para efectos del presente análisis de los huracanes en los modelos numéricos, el tema debería considerarse desde lo meteorológico y desde lo climatológico.

### *1.2.1 Meteorología de los huracanes*

En la evolución de los ciclones tropicales se distinguen tres fases: depresión tropical, tormenta tropical y huracán. Estas fases se diferencian por los valores de presión atmosférica y de la

velocidad del viento que va alcanzando el ciclón tropical en su desarrollo. Si la velocidad sobrepasa los 33 m/s (118 km/hora) se considera huracán.

En la dinámica atmosférica que conduce a la formación y desarrollo de los ciclones tropicales se deben conjugar por lo menos las condiciones siguientes: 1) temperatura de la superficie del océano mayor de 26,5-28°C; 2) convergencia en la troposfera inferior (originada por una baja presión atmosférica en superficie asociada a una ondulación en los vientos alisios) y divergencia en la troposfera superior (propiciada por una alta presión a esa altura) que favorezca los movimientos verticales ascendentes para impulsar la convección y el correspondiente transporte de masa (vapor de agua) y energía (calor sensible y latente) y 3) débil cortante (cizalladura) vertical del viento (débil gradiente vertical del viento), tal que facilite el desarrollo del flujo vertical generado por la convección. Gran parte de la energía que favorece el desarrollo de estos sistemas es el calor latente que se libera en la condensación del vapor de agua transportado por la convección. Por ello es importante la disponibilidad de humedad en el aire y las condiciones que favorezcan el desarrollo de la convección fuerte que lleve este vapor al nivel de condensación. Estos últimos son procesos que se desarrollan en la mesoescala (10-100 kilómetros) y en la microescala (centímetros y 1-10 metros).

Solo con la conjugación de las condiciones anteriores, el ciclón tropical puede formarse sobre el mar y tener un período de vida de varios días. Un ciclón tropical desde su formación hasta la fase de huracán y posterior decaimiento puede durar hasta una-dos semanas, lapso durante el cual se desplaza sobre diversas regiones; hay casos excepcionales en los que el período de vida de los ciclones tropicales es mayor. La fase de huracán puede durar unos tres días, durante los cuales el sistema se traslada por diferentes regiones según una trayectoria. El desplazamiento del ciclón tropical sobre continente implica su debilitamiento toda vez que se reduce el aporte de energía (calor latente) proveniente del vapor de agua suministrado por la superficie del mar.

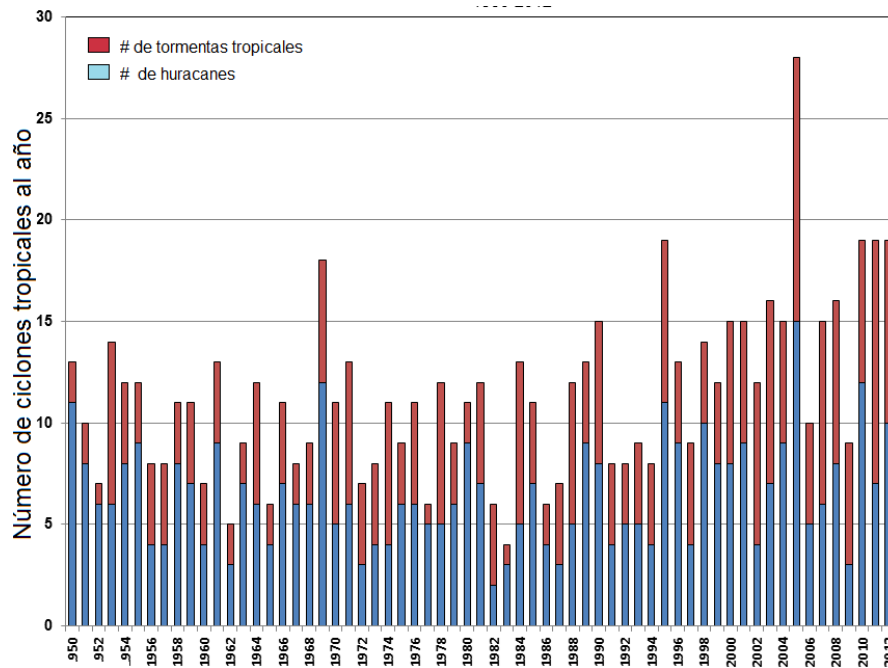
### *1.2.2 Climatología de los huracanes*

Hay regiones del planeta en las que en algunas épocas del año las condiciones predominantes facilitan la coincidencia de las condiciones mínimas para la formación y desarrollo de los

ciclones tropicales y que estos alcancen la fase de huracán. Estas regiones son: Pacífico tropical occidental (en el hemisferio norte y en hemisferio sur), Océano Índico, Atlántico tropical nororiental, el Mar Caribe y el Golfo de México. En sectores como el Pacífico tropical suroriental y el Atlántico suroriental no presentan actividad de ciclones tropicales porque al menos una de las condiciones generalmente no se cumple: la temperatura de la superficie del mar es menor de 28°C. (En el Pacífico tropical se observan las anomalías cálidas de la superficie del mar relacionadas con el fenómeno de El Niño, eventualmente esta condición se puede observar suroriental, no obstante, las demás condiciones no ocurren).

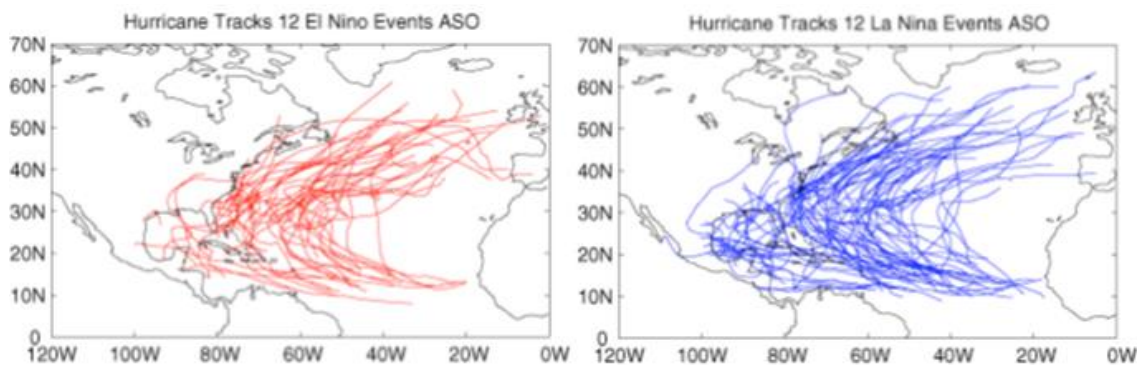
En el Atlántico tropical, el Mar Caribe y el Golfo de México las condiciones precisas para la formación y desarrollo de ciclones tropicales suelen presentarse entre junio y noviembre de cada año. En promedio en esta región se registran diez tormentas tropicales de las que seis llegan a la categoría de huracán. Pero hay años en que ocurren más y años en los que se presentan menos número de estos sistemas, lo cual ocurre porque, como se anotó arriba, la variabilidad climática regula su frecuencia.

En la Figura 1, en la que se presenta el comportamiento del número de tormentas y de huracanes desde 1950 a 2012, es posible constatar la variabilidad interanual en la frecuencia de tales fenómenos meteorológicos. Se ha establecido que bajo condiciones El Niño se presenta menor número y bajo condiciones La Niña mayor número. El efecto de los fenómenos El Niño y La Niña ocurre no sólo en la frecuencia sino también en las trayectorias. La Figura 2 presenta las trayectorias de los huracanes en el Atlántico tropical, Mar Caribe y Golfo de México diferenciadas para períodos bajo la influencia del fenómeno de El Niño o de La Niña. Además de mostrar un mayor número bajo las fases La Niña, la Figura 2 permite observar que durante esta fase de la variabilidad climática las trayectorias en el sector del Caribe y Golfo de México pasan más al sur y más al occidente de lo que se presenta en condiciones El Niño.



**Figura 1**

Comportamiento del número anual de ciclones tropicales y de huracanes en la cuenca del Atlántico tropical durante el período 1950-2012



**Figura 2**

Trayectoria de los huracanes en el Atlántico tropical, Mar Caribe y Golfo de México en años El Niño (izquierda) y La Niña (derecha).

Tomado de S.Bussinger en <http://www.pitt.edu/~super7/20011-21001/20671.pdf>.

En cuanto al efecto del calentamiento global y del cambio climático en la frecuencia, intensidad y trayectoria de los huracanes aún no hay señales claras de lo que podría ocurrir en el largo plazo.

Algunos análisis previos (ver IPCC, 2007) señalaron que están aumentando la frecuencia y la intensidad de los huracanes, sin embargo el número de huracanes no presenta una clara tendencia de largo plazo ni al aumento ni a la disminución de la frecuencia, ni de la intensidad (Figura 1). La evaluación del 2007 se basó en análisis de la información disponible hasta ese entonces, en la que la actividad intensa de tormentas y huracanes de 2005 generaba una marcada tendencia al aumento de la frecuencia. Sin embargo, a la luz de la información hasta el 2012 (ver Figura 1), tal tendencia no se registra y algunos análisis (Holland&Webster, 2007; Landsea et al., 2007) han confrontado esta afirmación.

### **1.3 Los modelos meteorológicos y los modelos climáticos**

En el estudio de la dinámica atmosférica y del clima se acude a una variedad de tipos de modelos (conceptuales, estadísticos, probabilísticos, heurísticos, numéricos, entre otros), de los cuales hoy en día los más utilizados son los modelos numéricos. Estos están basados en la solución numérica de las ecuaciones diferenciales que representan diversos aspectos de los procesos atmosféricos y climáticos. Las ecuaciones diferenciales se resuelven con ayuda de diversas aproximaciones (diferencias finitas, elementos finitos) para los puntos de una malla tridimensional por determinados intervalos de tiempo (por ejemplo cada 5 o 15 minutos) hasta completar un período de simulación (horas, varios días, meses o años). En la Figura 3 se muestra una representación esquemática de la malla de los diferentes componentes de un modelo climático.

La distancia de los puntos de la malla en el plano horizontal se denomina resolución espacial. Hay modelos en resolución espacial muy gruesa (500x500 kilómetros), gruesa (100x100 ó 200x200 kilómetros), alta resolución (20x20 ó 50x50 kilómetros) y muy alta resolución (5x5 ó 10x10 kilómetros). Dependiendo de la escala de los procesos que se quieren representar, se usa una malla en resolución gruesa o en alta resolución. Así, por ejemplo, los sistemas de circulación general de la atmósfera (los alisios, los Oestes de latitudes medias, los monzones) se pueden representar en modelos de resolución gruesa.

La resolución temporal (los intervalos de tiempo para los que se hacen los cálculos y la solución de las ecuaciones) que se utilice en el modelo también depende de la escala de los procesos que



se busca representar. La formación de nubes de tormenta (que se desarrolla en cuestión de minutos y horas) requiere de modelos de muy alta resolución temporal (y espacial también), mientras que los sistemas sinópticos como los frentes atmosféricos de las latitudes medias (su escala temporal es de días) se pueden representar bien con modelos de alta o media resolución.

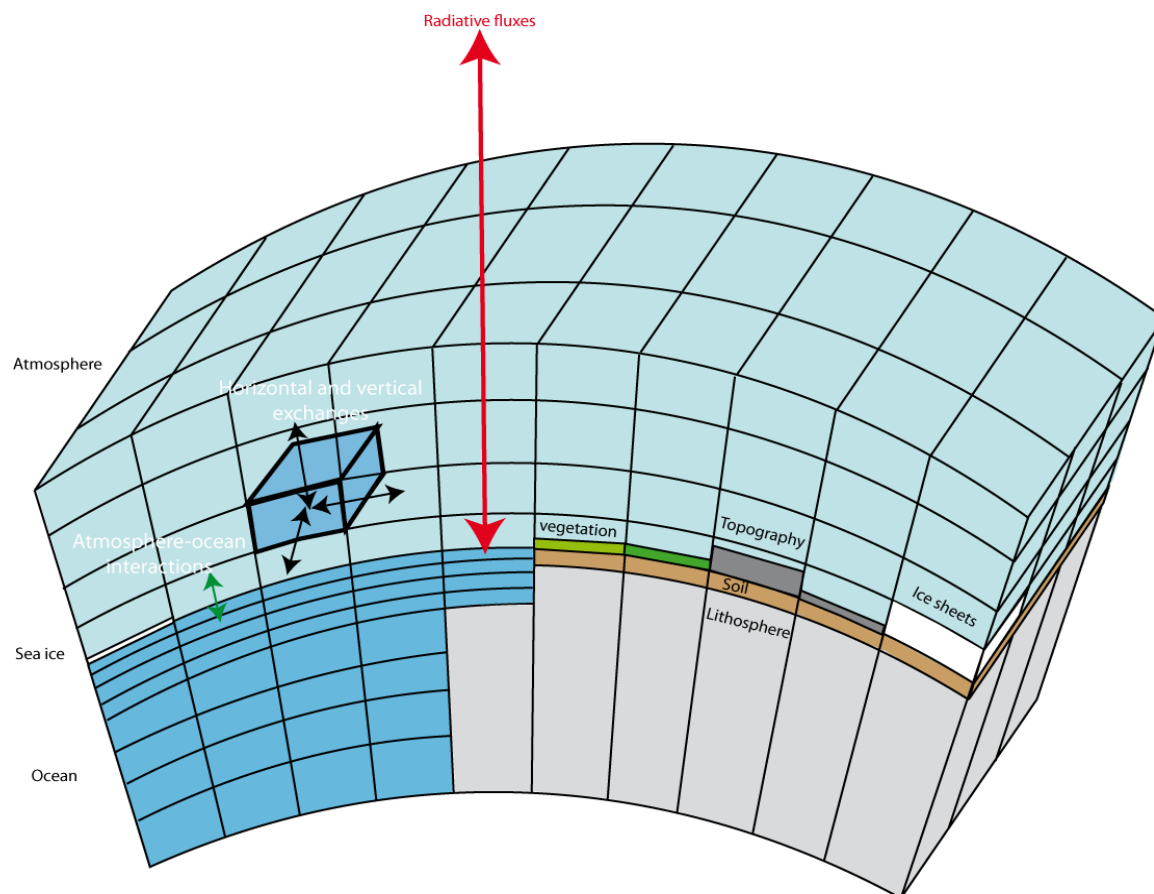
En la dinámica atmosférica los procesos de microescala y mesoescala pueden tener efectos importantes en la dinámica de procesos de mayor escala y no considerarlos genera problemas en la solución de las ecuaciones y finalmente en los resultados de la modelación. Por ello, en los modelos de baja resolución o resolución gruesa, al no poder representar explícitamente los procesos de mesoescala y microescala, se acude a lo que se denomina parametrización. Esta última consiste en incluir los procesos de escalas menores a los de la malla del modelo con base en parámetros obtenidos a partir de la información disponible en los puntos de malla de la cuadrícula del modelo. Así, los modelos generalmente deben parametrizar la convección, la turbulencia de la capa límite y los procesos radiativos de la superficie. Hay diversas propuestas (esquemas) de parametrización de los procesos mencionados, unos mejores en algunos aspectos que otros, que son usados en los modelos numéricos.

Los modelos meteorológicos, deben considerar las características hidrológicas y radiactivas de la superficie terrestre (suelo o agua), básicamente reproducen los procesos atmosféricos de diversa escala. En la actualidad se ha avanzado tanto en esquemas de parametrización como en la representación explícita de los procesos de mesoescala y de microescala en los modelos meteorológicos de muy alta resolución. Gracias a ello, la representación de la dinámica atmosférica ha mejorado, lo que ha conllevado a mejores pronósticos del tiempo en el horizonte de hasta tres días.

Los modelos climáticos sintetizan de manera aproximada el conjunto complejo de elementos, procesos e interacciones que participan en la dinámica del sistema climático que genera las condiciones atmosféricas predominantes (clima) en una región. Hace varios decenios, los modelos climáticos numéricos se basaban en la circulación general de la atmósfera (MCGA), tal vez los menos complejos de los numéricos, aunque consideran toda la complejidad de los procesos atmosféricos que controlan la circulación. Actualmente se dispone de herramientas

avanzadas y ampliamente utilizadas para la simulación del clima que incluyen los progresos logrados en el conocimiento de la dinámica del sistema climático. Estos modelos son representaciones tridimensionales de los procesos que ocurren en el sistema climático global y son de diversa complejidad. Hoy en día el progreso en el modelamiento de clima ha avanzado hasta la conformación de modelos acoplados que no sólo consideran la atmósfera, sino que incluyen la interacción entre los diferentes componentes del sistema climático (atmósfera, océano, criósfera, etc) como el que se presenta en la Figura 3.

Cada modelo (meteorológico o climático) presenta resultados diferentes en la simulación de una misma situación. Esto ocurre debido a que cada modelo tiene una particularidad en la representación de los procesos y fenómenos: por un lado, no representan toda la complejidad de los procesos y, en segundo lugar, utilizan diferentes esquemas de parametrización, por ejemplo. Por ello, un modelo, en ocasiones representa mejor (se aproxima más a la realidad) que otros un proceso o fenómeno. Sin embargo, siempre habrá parte de la realidad que el modelo no representa y aparece entonces un umbral que se denomina incertidumbre.



**Figura 3**

Representación esquemática de la malla para cada uno de los componentes del sistema climático acoplados en un modelo climático.

(Tomado de Goose et al., 2010)

La incertidumbre se puede reducir en la medida como se representan mejor los procesos en los modelos o mediante algún tratamiento especial a los resultados de los modelos. Por ejemplo, se podría decir que si consideramos todos los modelos y hacemos una especie de ensamble de esos modelos, estaríamos considerando muchos aspectos de los procesos atmosféricos y podríamos así asegurar la inclusión de más elementos que participan en la generación y desarrollo de estos sistemas, logrando de esta manera reducir incertidumbres (en esto último se basan los denominados ensambles multi-experimento y los ensambles multi-modelo). Sin embargo, hay aún aspectos desconocidos de los procesos que no se han incluido en los modelos, siempre habría procesos de menor escala difíciles de representar y, además, quedarían los elementos que están

más allá del límite de lo cognoscible, de tal manera que aún en esta aproximación siempre quedará algún grado de incertidumbre en los resultados de los modelos numéricos meteorológicos o climáticos.

#### **1.4 Los huracanes en los modelos meteorológicos y climáticos**

Se han logrado grandes avances en cuanto al modelamiento de los huracanes en la escala meteorológica con fines de pronóstico del tiempo. La predicción generada con varios días de anticipación y el seguimiento en tiempo real de los huracanes desde un satélite, han mejorado sustancialmente el grado de acierto acerca de la evolución de estos sistemas. A esto se suma la mejora en la resolución espacial (10x10 y hasta 4x4 kilómetros en algunos casos) y en la representación de los procesos como la convección y la microfísica de las nubes convectivas. El desarrollo de parametrizaciones en los modelos de resolución espacial gruesa o la representación explícita de estos procesos en los modelos de alta resolución espacial han conllevado a una mejora de la representación de los procesos involucrados en la dinámica de los huracanes. Aunque aún persisten dificultades en cuanto al pronóstico de la trayectoria.

En general, los modelos meteorológicos representan suficientemente bien los ciclones tropicales, dado que, además, al ser actualizados día a día con información real, están incluyendo las condiciones reales para simular la dinámica atmosférica de momento y proyectarla al futuro, considerando la dinámica atmosférica, en período de horas y algunos días.

En lo que se refiere a la simulación de las características climatológicas de los ciclones tropicales, entre ellos los huracanes, una reciente evaluación de la habilidad de gran parte de los modelos climáticos utilizados hasta ahora en la elaboración de escenarios de cambio climático para el siglo XXI, encontró que tienden a presentar una mayor intensidad que la realmente observada. Para el Atlántico tropical, algunos los modelos representan de manera satisfactoria la variabilidad interanual de la frecuencia y aún de las tendencias de largo plazo observadas (Gualdi et al., 2008; Zhao et al., 2010), pero tuvieron que hacer modificaciones o reemplazos de los esquemas de convección que inicialmente tenían los modelos.

Los modelos que mejor representan las particularidades climatológicas de los huracanes son los de media resolución espacial (cuadrícula con pasos menores de 50x50 kilómetros) con esquemas de convección mejorados; la mayor parte de los modelos climáticos tienen resoluciones espaciales gruesas (cuadrículas del orden de los 100x100 ó 200x200 kms) en las que difícilmente se pueden representar los procesos conectivos de mesoescala y microescala involucrados en la dinámica de los huracanes, aunque incluyen los más recientes avances en cuanto a parametrización de la convección se refiere. Los procesos de menor escala como la microfísica de las nubes, importantes en la evolución de los ciclones tropicales, prácticamente no pueden ser incorporados en los modelos de baja resolución espacial. En efecto, en la evaluación de Walsh et al. (2010) de los modelos usados para estudios de huracanes, se encontró que los de resolución espacial gruesa producen pobres resultados, particularmente en la detección de ciclones tropicales, razón por la que subestiman la frecuencia de estos fenómenos.

Utilizar modelos climáticos para la simulación de los huracanes demanda enormes recursos computacionales (memoria, almacenamiento, tiempo de cómputo, entre otras necesidades) toda vez que es necesario una alta o muy alta resolución tanto espacial como temporal. Una forma de salvar esta dificultad es analizar en alta resolución los procesos sobre una región mediante el uso de modelos de alta resolución anidados en los modelos globales que generalmente son de baja resolución. Así, la alta resolución sería sólo para una región limitada de interés y no para todo el globo, lo que reduce los requerimientos en cuanto a recursos computacionales se refiere. En este caso los resultados de la simulación para una región dependerán tanto de las características del modelo global de representar los procesos de gran escala, como de las particularidades del modelo en alta resolución que se anida en el primero. Así, N modelos regionales y N modelos globales darán NxN resultados diferentes.

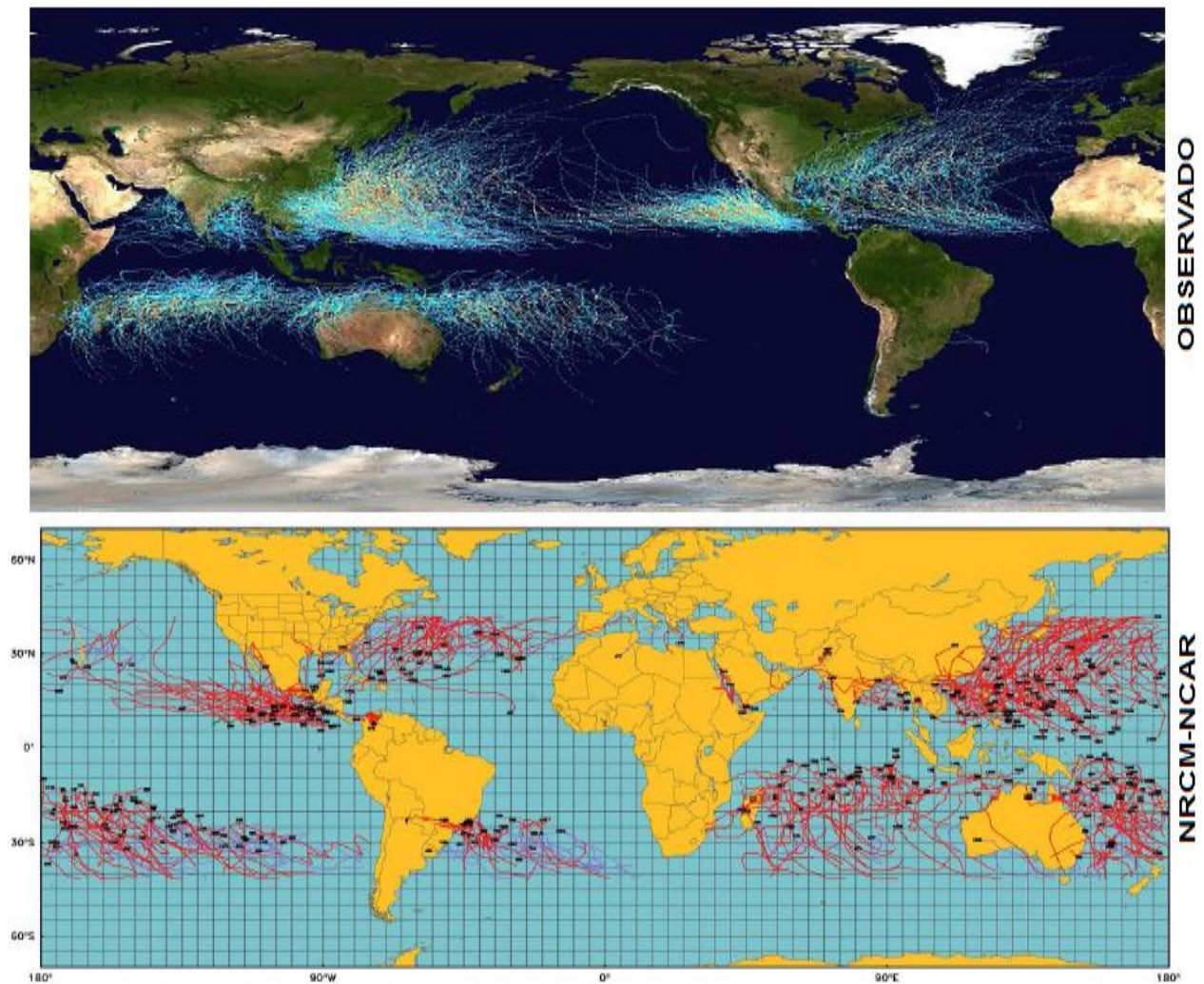
Uno de los esfuerzos recientes de estudiar las características climatológicas de los huracanes, particularmente los de la cuenca del Atlántico tropical, fue realizado en el proyecto Nested Regional Climate Model (NCRM) del National Center for Atmospheric Research (NCAR) en el que el modelo meteorológico Weather&Research Forecasting (WRF) se anidó en el modelo Community Climate System Model (CCSM) para estudiar diferentes particularidades climatológicas de los huracanes en la cuenca del Atlántico tropical, región que cubre el Atlántico

tropical, Norte de Suramérica, Mar Caribe, Centroamérica y Golfo de México, parte de SE de los Estados Unidos.

En el NCRM el modelo global operó en una malla de 150x150 kms y el modelo regional se ejecutó en una malla de 36x36 kms para la zona tropical, de 12x12 para la cuenca del Atlántico tropical y de 4x4 kms para dos dominios sobre los Estados Unidos (uno en el SE y otro al W). Como se puede ver, la resolución espacial para la Cuenca del Atlántico tropical ya permite ver en detalle los ciclones tropicales.

Los resultados de las simulaciones de la trayectoria de los ciclones tropicales en la zona tropical se muestran en la Figura 4. Se puede ver que para las regiones del Pacífico occidental y el Océano Indico hay una satisfactoria representación de la actividad de ciclones tropicales. No obstante, aparece actividad en el Pacífico suroriental y en el Atlántico sur, sectores en los que dicha actividad históricamente ha sido extremadamente reducida o nula. En la cuenca del Atlántico tropical (sector norte) la actividad de los ciclones tropicales aparece desplazada más al norte que lo real, hay pocos huracanes sobre el Mar Caribe y el Golfo de México; también aparecen ciclones tropicales que nacen sobre el continente en el norte de Suramérica (zona del Golfo de Maracaibo, La Guajira, Sierra Nevada de Santa Marta). En resumen, la actividad de ciclones tropicales para este sector no se representa lo suficientemente bien.

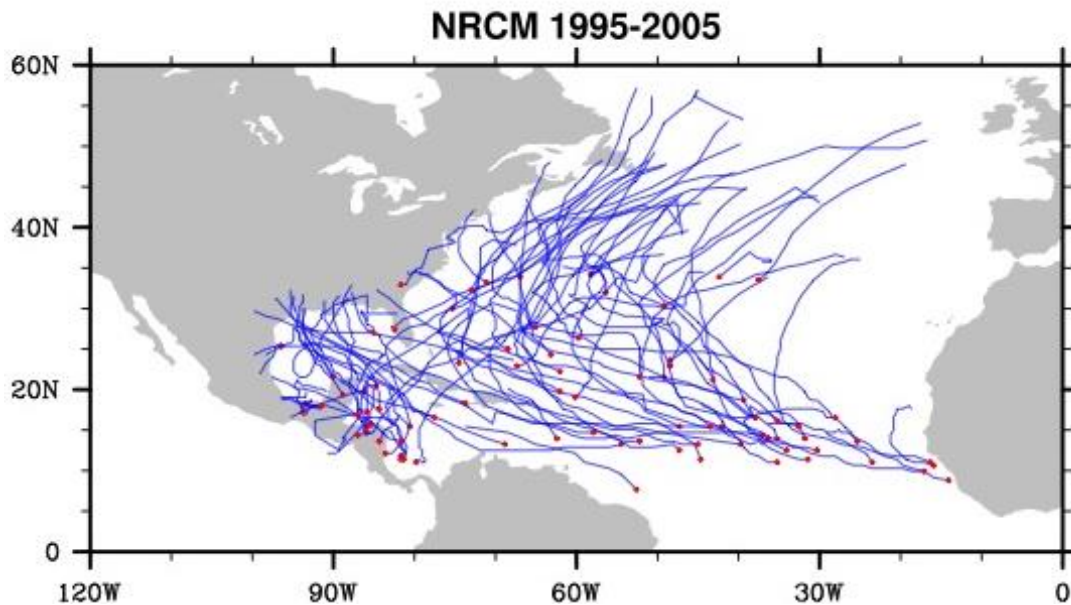
El análisis de la causa de los errores que conllevaron a esta inexacta representación de la actividad ciclónica tropical permitió establecer que el modelo CCSM tenía errores en la representación de la localización de la zona de cizalladura vertical baja: la localizaba más al norte. También había problemas en la representación de la localización del área de mayor temperatura de la superficie del mar en el Atlántico tropical.



**Figura 4**

Comparación de las trayectorias los ciclones tropicales reales históricos (arriba) y las obtenidas mediante las simulaciones de NRCM (WRF+CSCM) Tomado de John Truesdale.

Los errores para la cuenca del Atlántico tropical se corrigieron mediante un ajuste a los datos de la salida de CCSM y de NCRM (no a un arreglo en la representación de los procesos en CCSM). Los resultados obtenidos para las trayectorias después del ajuste se muestran en la Figura 5.



**Figura 5**

Trayectorias de los ciclones tropicales simulados por NRCM después del ajuste efectuado a CCSM en cuanto a posición del área de cizalladura baja y de la temperatura de la superficie del mar.

Otra de las dificultades en los resultados de NCRM para la Cuenca del Atlántico tropical consistió en que se presenta un número de tormentas y huracanes más bajo que el real debido a que hay una tendencia en CCSM a presentar con más frecuencia que la normal condiciones cálidas en el Pacífico tropical oriental (tipo fenómeno El Niño).

Para reducir las incertidumbres de los resultados de NCRM habría que desarrollar la misma aproximación con otros modelos globales como el HadCM (del Centro Hadley de Reino Unido) el ECHAM5 (tal vez ECHAM6, del Max Planck fur Meteorology, Hamburgo, Alemania) que representan satisfactoriamente algunos procesos de la región. Habría que explorar como representan la localización de la zona de baja cizalladura vertical y de alta temperatura de la superficie del mar. No obstante, realizar estos proyectos requiere muy altos recursos computacionales, de conocimiento y de tiempo (como mínimo dos años) y los resultados estarían disponibles en el largo plazo, no en los próximos meses.



## **2. EVALUACIÓN PROBABILISTA DE LA AMENAZA POR HURACÁN**

### **2.1 Introducción**

Los huracanes tienen la característica de ser eventos altamente destructivos, con frecuencias altas de ocurrencia. La modelación de la amenaza por huracán tiene en cuenta los efectos relacionados con la velocidad del viento, intensidad de precipitación y la altura de marea de tormenta. Para el presente proyecto se analizan exclusivamente los efectos relacionados con la velocidad del viento a nivel nacional.

El modelo de amenaza empleado pronostica las intensidades máximas asociadas a la posible ocurrencia y paso de un huracán por el territorio, a partir de un procedimiento estadístico conocido como *perturbación*, el cual permite generar trayectorias aleatorias que conservan las características principales de las trayectorias históricas identificadas. La amenaza se representa entonces como un conjunto de eventos estocásticos con intensidad y frecuencias medias de ocurrencia compatibles con la información histórica disponible.

El procedimiento matemático de cálculo de la velocidad del viento se encuentra descrito en detalle en el Anexo 1.

### **2.2 Evaluación de la amenaza por huracán para el período 1851-2010**

#### **2.2.1 Información empleada en la modelación**

El modelo de amenaza por huracán requiere de información específica, que puede encontrarse disponible para cierto nivel de detalle. La calidad de la modelación dependerá del detalle con que se cuente en toda la información recolectada. Se requieren las siguientes capas de información geográfica para la aplicación del modelo de amenaza por huracán en Guatemala:

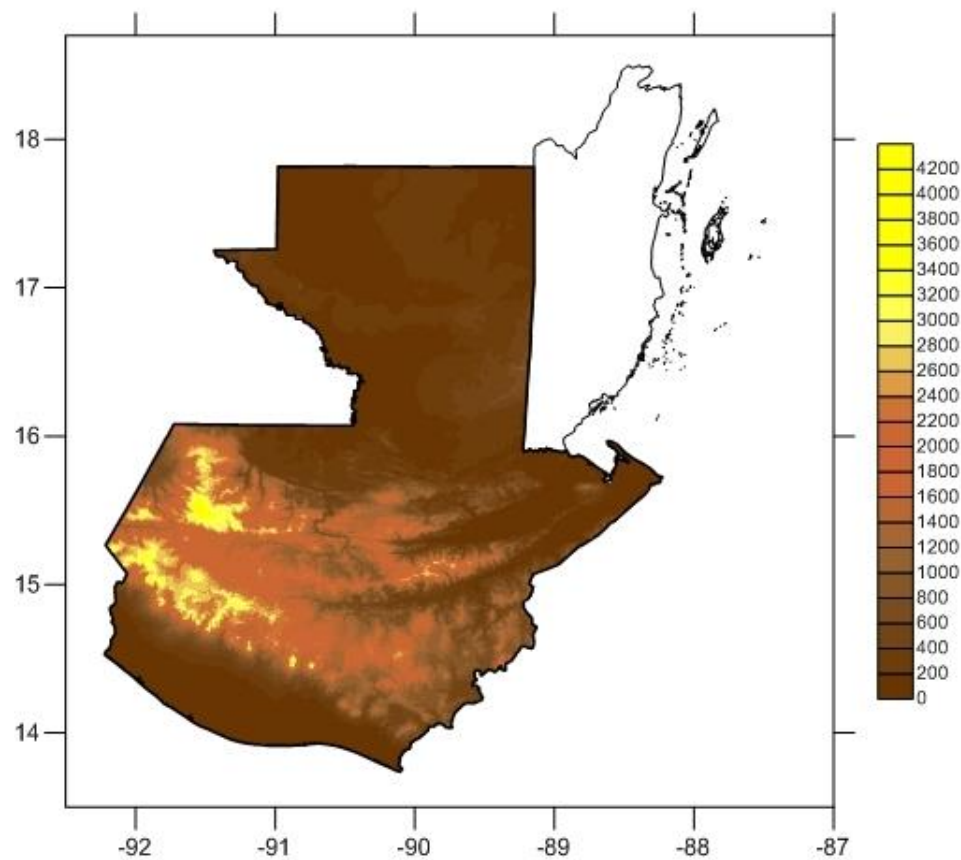
- a) Topografía.
- b) Áreas urbanas y uso de suelo.

c) Catálogo de huracanes.

La información que fue posible obtener para la modelación de la amenaza de huracán se describe a continuación.

### **Topografía**

La topografía permite definir las condiciones de exposición al viento que presenta una determinada zona, teniendo en cuenta la pendiente del terreno en una distancia horizontal dada. Dentro de la información disponible por medio de sensores remotos se encuentran modelos de elevación digital con una resolución espacial de 30, 90, 1000 y 2000 metros, aproximadamente, para la República de Guatemala. Para un análisis a nivel país se considera que una resolución de 1000 metros (30 segundos) es adecuada. Se trabajó entonces con una capa de topografía obtenida de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration de los Estados Unidos) con una resolución espacial de 30 segundos (930 metros aproximadamente), como se muestra en la Figura 6, para el cálculo de los factores de exposición al viento a nivel nacional.



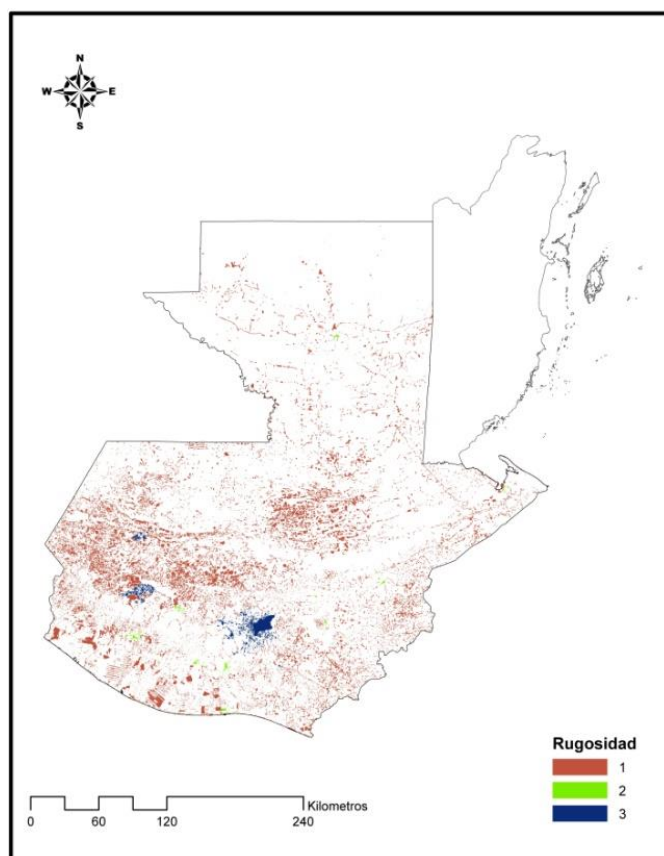
**Figura 6**

Modelo de Elevación Digital República de Guatemala (Resolución espacial 30 segundos)

### **Áreas urbanas y rugosidad**

La rapidez con que la velocidad del viento aumenta con la altura es función de la rugosidad del terreno. Por lo tanto, el gradiente de velocidad debe encontrarse a partir de la información geográfica de usos del suelo, la cual permite establecer las condiciones de rugosidad específicas para cada zona de análisis. La información de polígonos de áreas urbanas se obtuvo de la oficina de Cartografía Digital del Instituto Nacional de Estadística –INE de Guatemala. La capa de información presenta contornos de cada centro poblado en la República de Guatemala, permitiendo la discretización e individualización del análisis de rugosidad de cada uno de los centros poblados del país.

Teniendo en cuenta dichos contornos, la Figura 7 presenta el mapa de valores de rugosidad para el país, con base en las características principales de urbanización y uso de suelo.



**Figura 7**

Mapa de valores de rugosidad para la República de Guatemala

## Catálogo de Huracanes

Las trayectorias de los huracanes históricos, al igual que los diferentes parámetros de intensidad asociados y su variación con la trayectoria, se obtuvieron de la base de datos IBTrACS, de la agencia estadounidense NOAA (Disponible en: <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ibtracs/>). Ésta base de datos cuenta con la siguiente información:

- Fecha de aviso (hora, día, mes y año)

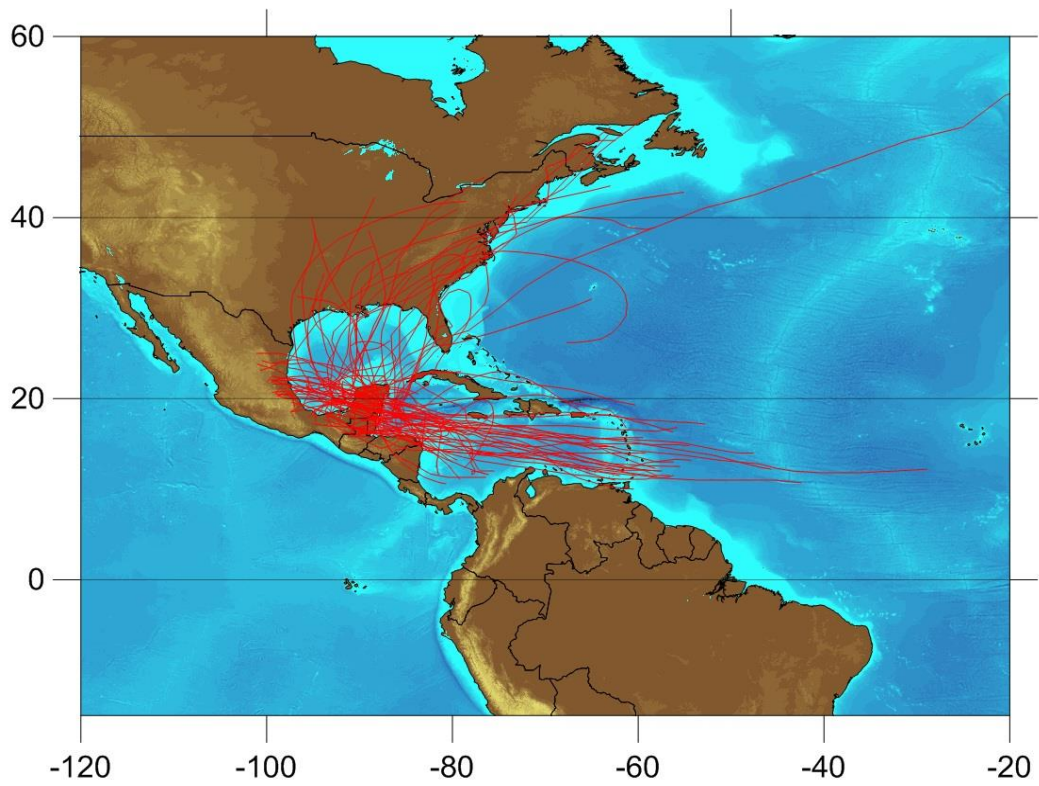
- Presión central del ciclón (en milibares), registrada por diferentes agencias meteorológicas a nivel mundial
- Posición geográfica (latitud, longitud)
- Velocidad máxima sostenida de viento promediada a 1 min, registrada por diferentes agencias meteorológicas a nivel mundial<sup>1</sup>
- Cuenca y subcuenca a la cual pertenece el huracán registrado

En la Figura 8 se presenta la totalidad de huracanes seleccionados del catálogo de IBTrACS desde 1866 hasta 2010 que tuvieron algún nivel de afectación, en cuanto a intensidad de velocidad del viento en el territorio de Guatemala.

En total fueron seleccionados 77 huracanes de diferentes categorías en la escala Saffir – Simpson. De la Tabla 1 a la Tabla 5 se presentan las características e identificación de los huracanes que fueron seleccionados para el análisis, teniendo en cuenta su categoría Saffir – Simpson.

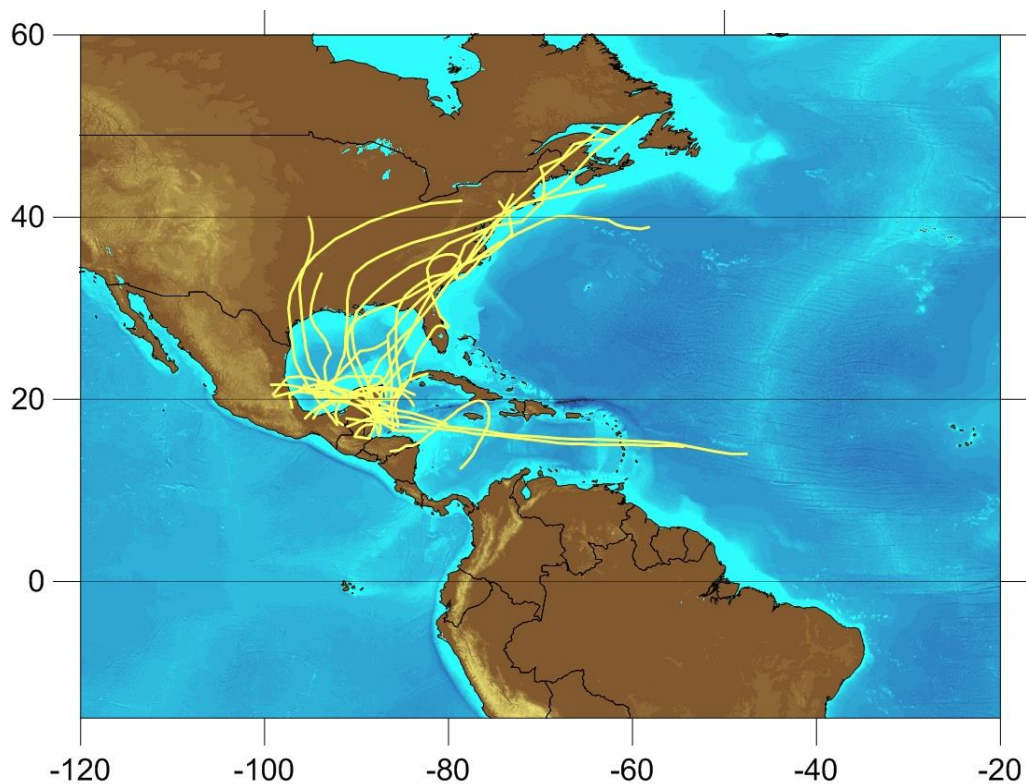
---

<sup>1</sup> Esta corresponde a la velocidad máxima del viento (Km/h) promediada en ráfagas de 1 minuto de duración.



**Figura 8**

Huracanes seleccionados con afectación en la República de Guatemala



**Figura 9**

Eventos seleccionados Categoría SS=1

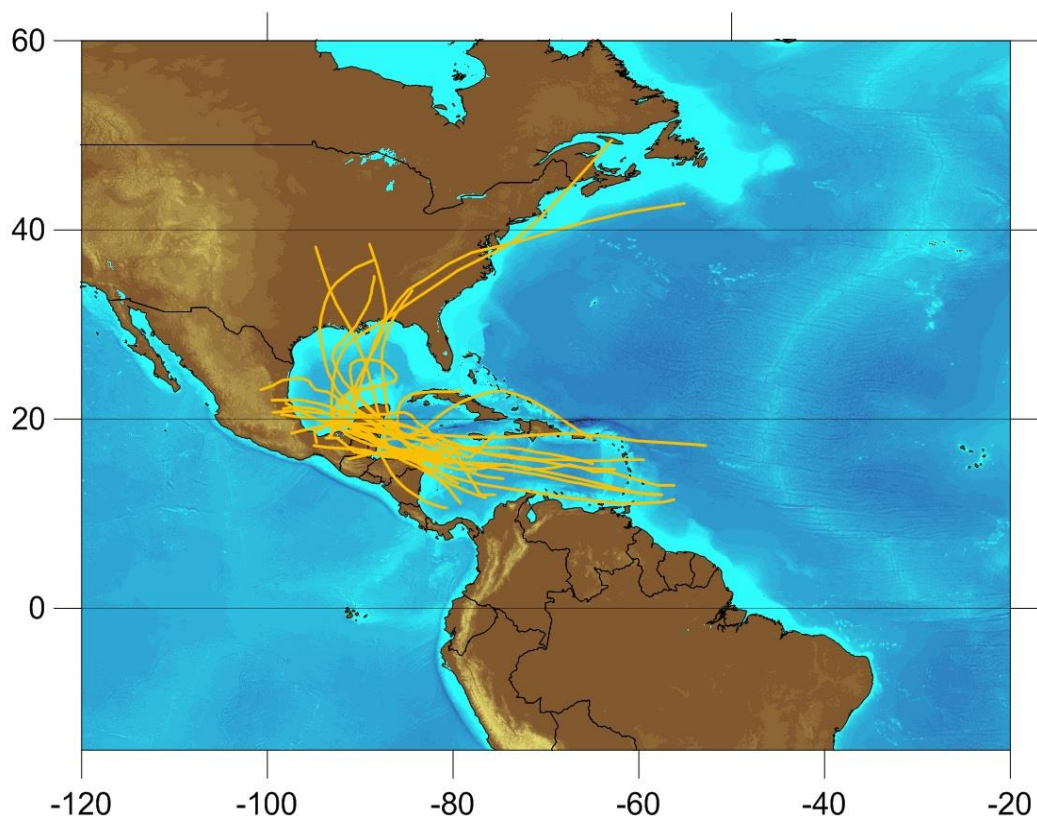
**Tabla 1**

Eventos seleccionados categoría SS = 1

<b>Nombre</b>	<b>Fecha inicio</b>	<b>Fecha final</b>	<b>Vel. Máxima [Km/h]</b>	<b>Vel. Promedio [Km/h]</b>	<b>Categoría SS</b>
Abby	01/06/1968	13/06/1968	120.38000	68.08800	1
AGNES	24/09/1971	03/10/1971	138.90000	82.81100	1
BRENDA	31/08/1972	05/09/1972	148.16000	90.86400	1
CINDY	19/09/2004	28/09/2004	120.38000	57.52400	1
DEBBY	21/08/1987	24/08/1987	120.38000	71.76500	1
DOLLY	19/08/1996	23/08/1996	129.64000	86.11800	1
Flossy	21/09/1956	30/09/1956	148.16000	78.35400	1
GORDON	18/08/2000	25/08/2000	129.64000	68.78900	1
HENRI	04/09/1979	15/09/1979	138.90000	63.39500	1
JERRY	10/09/1989	13/09/1989	138.90000	84.88300	1
NOTNAMED	26/08/1864	01/09/1864	129.64000	126.07800	1

<b>Nombre</b>	<b>Fecha inicio</b>	<b>Fecha final</b>	<b>Vel. Máxima [Km/h]</b>	<b>Vel. Promedio [Km/h]</b>	<b>Categoría SS</b>
NOTNAMED	30/10/1870	03/11/1870	129.64000	113.89800	1
NOTNAMED	25/09/1874	01/10/1874	148.16000	98.29800	1
NOTNAMED	21/06/1902	29/06/1902	129.64000	71.76500	1
NOTNAMED	28/10/1913	30/10/1913	120.38000	86.11800	1
NOTNAMED	27/08/1916	02/09/1916	129.64000	103.64100	1
NOTNAMED	16/06/1921	26/06/1921	148.16000	82.47900	1
NOTNAMED	27/09/1924	01/10/1924	120.38000	77.89300	1
NOTNAMED	10/09/1933	15/09/1933	138.90000	104.94700	1
NOTNAMED	04/06/1934	21/06/1934	129.64000	89.79400	1
NOTNAMED	19/10/1935	26/10/1935	138.90000	115.00300	1
NOTNAMED	28/08/1936	30/08/1936	129.64000	99.33500	1
NOTNAMED	19/09/1944	22/09/1944	129.64000	125.01000	1
STAN	23/09/2005	26/09/2005	129.64000	76.54900	1





**Figura 10**

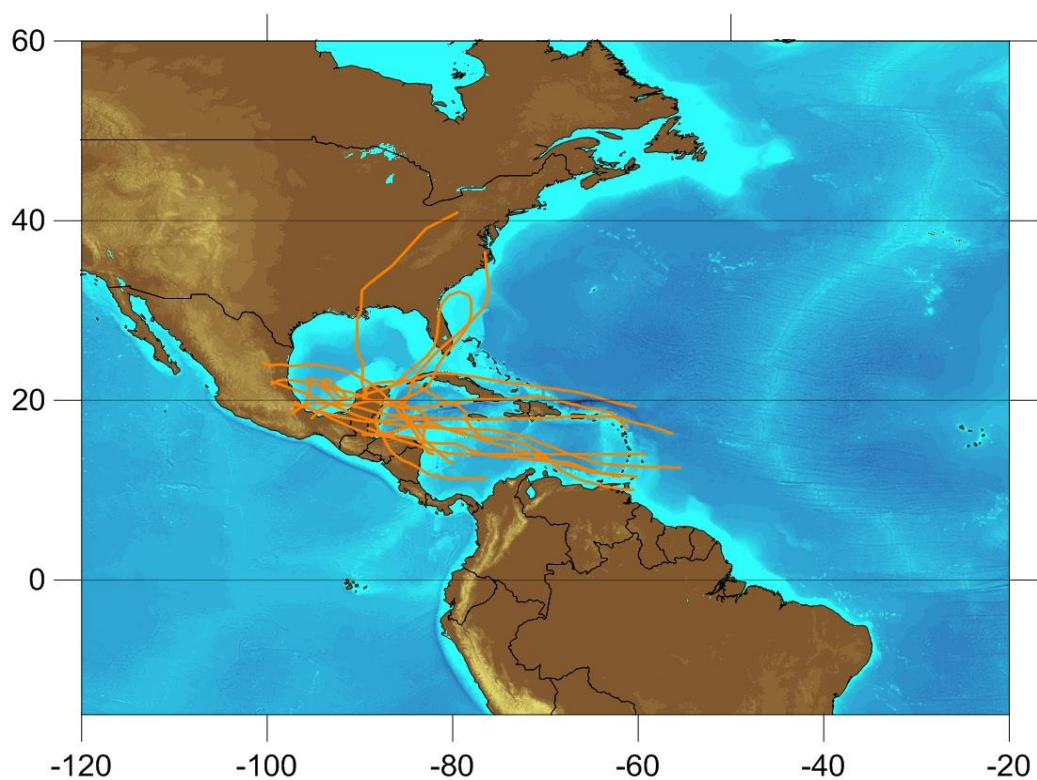
Eventos seleccionados Categoría SS=2

**Tabla 2**

Eventos seleccionados categoría SS = 2

<b>Nombre</b>	<b>Fecha inicio</b>	<b>Fecha final</b>	<b>Vel. Máxima [Km/h]</b>	<b>Vel. Promedio [Km/h]</b>	<b>Categoría SS</b>
Abby	10/07/1960	16/07/1960	157.42000	105.16700	2
ALEX	08/09/2009	16/09/2009	175.94000	97.08100	2
DIANA	20/09/1989	24/09/1989	157.42000	87.97000	2
FIFI	26/08/1974	02/09/1974	175.94000	103.57500	2
GERT	24/08/1993	31/08/1993	157.42000	75.10900	2
LAURIE	21/09/1969	15/10/1969	166.68000	81.57600	2
NOTNAMED	13/08/1866	18/08/1866	166.68000	149.04200	2
NOTNAMED	19/08/1879	24/08/1879	166.68000	114.97800	2
NOTNAMED	20/07/1887	28/07/1887	157.42000	134.01300	2

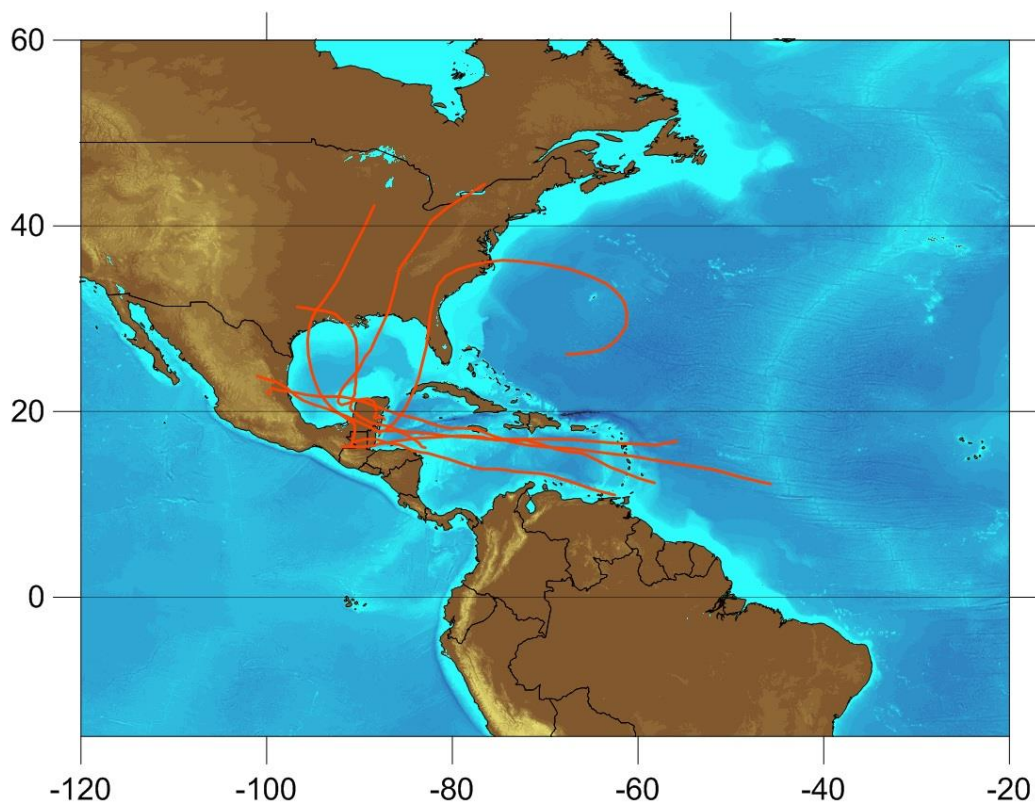
NOTNAMED	12/09/1889	26/09/1889	175.94000	111.90500	2
NOTNAMED	05/10/1892	16/10/1892	157.42000	135.40200	2
NOTNAMED	04/07/1893	07/07/1893	157.42000	113.10400	2
NOTNAMED	04/09/1893	09/09/1893	157.42000	99.04200	2
NOTNAMED	04/10/1902	13/10/1902	166.68000	107.77600	2
NOTNAMED	09/10/1916	19/10/1916	175.94000	104.94700	2
NOTNAMED	22/08/1918	26/08/1918	166.68000	120.38000	2
NOTNAMED	16/09/1920	23/09/1920	157.42000	75.35700	2
NOTNAMED	11/10/1922	22/10/1922	175.94000	90.78800	2
NOTNAMED	08/09/1931	16/09/1931	157.42000	110.27800	2
NOTNAMED	05/11/1942	11/11/1942	157.42000	99.21400	2
NOTNAMED	02/10/1945	05/10/1945	157.42000	121.30600	2
NOTNAMED	09/08/1947	16/08/1947	175.94000	102.17900	2
PAULA	11/10/2010	17/10/2010	166.68000	108.03300	2
RICHARD	19/10/2010	26/10/2010	157.42000	81.10500	2



**Figura 11**  
Eventos seleccionados Categoría SS=3

**Tabla 3**  
**Eventos seleccionados categoría SS = 3**

<b>Nombre</b>	<b>Fecha inicio</b>	<b>Fecha final</b>	<b>Vel. Máxima [Km/h]</b>	<b>Vel. Promedio [Km/h]</b>	<b>Categoría SS</b>
Anna	20/07/1961	24/07/1961	185.20000	152.32700	3
ELLA	22/11/1969	19/05/1970	203.72000	94.91500	3
FRANCELIA	14/08/1969	21/08/1969	185.20000	109.74800	3
Hilda	10/09/1955	20/09/1955	203.72000	134.38900	3
Isbell	08/10/1964	17/10/1964	203.72000	90.21900	3
ISIDORE	23/11/2001	10/09/2002	203.72000	99.67100	3
KARL	13/09/2010	24/09/2010	203.72000	107.33200	3
NOTNAMED	31/08/1888	08/09/1888	203.72000	145.98100	3
NOTNAMED	08/10/1906	23/10/1906	194.46000	117.44000	3
NOTNAMED	05/09/1931	12/09/1931	203.72000	93.23900	3
NOTNAMED	25/09/1932	03/10/1932	194.46000	102.65400	3
NOTNAMED	23/09/1941	30/09/1941	194.46000	119.05700	3
ROXANNE	27/09/1995	07/10/1995	185.20000	101.19900	3



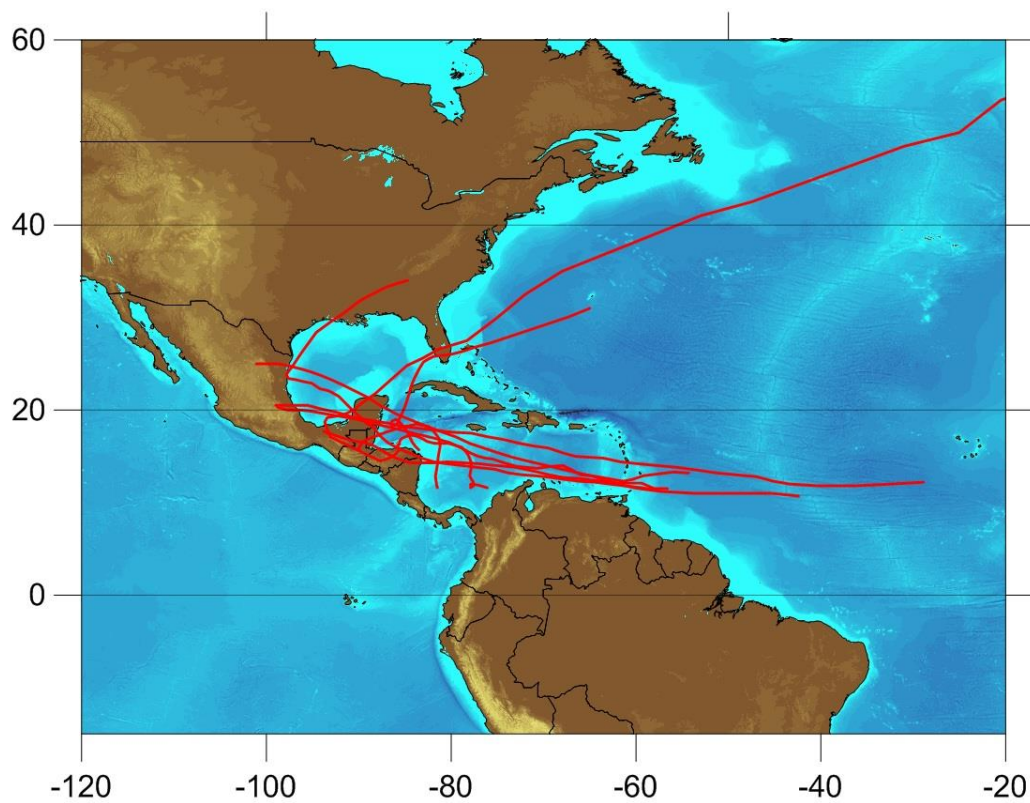
**Figura 12**

Eventos seleccionados Categoría SS=4

**Tabla 4**

Eventos seleccionados categoría SS = 4

<b>Nombre</b>	<b>Fecha inicio</b>	<b>Fecha final</b>	<b>Vel. Máxima [Km/h]</b>	<b>Vel. Promedio [Km/h]</b>	<b>Categoría SS</b>
CARMEN	16/09/1973	26/08/1974	240.76000	122.64800	4
Charlie	12/08/1951	23/08/1951	212.98000	128.45800	4
GRETA	30/08/1978	05/09/1978	212.98000	118.83700	4
IRIS	11/09/2001	19/09/2001	231.50000	123.32600	4
KEITH	22/09/2000	30/09/2000	222.24000	108.87500	4
NOTNAMED	05/10/1946	14/10/1946	212.98000	74.55500	4
NOTNAMED	30/09/1949	06/10/1949	212.98000	102.19100	4
OPAL	24/09/1995	01/10/1995	240.76000	101.14800	4



**Figura 13**

Eventos seleccionados Categoría SS=5

**Tabla 5**

Eventos seleccionados categoría SS = 5

Nombre	Fecha inicio	Fecha final	Vel. Máxima [Km/h]	Vel.	Categoría SS
				Promedio [Km/h]	
DEAN	22/09/2006	02/10/2006	277.80000	161.83000	5
EDITH	20/10/1970	04/08/1971	259.28000	96.41300	5
EMILY	11/07/2005	21/07/2005	259.28000	150.05400	5
FELIX	03/10/2006	12/05/2007	277.80000	132.94700	5
Hattie	27/10/1961	01/11/1961	259.28000	183.81100	5
Janet	21/09/1955	30/09/1955	277.80000	186.25800	5
MITCH	22/10/1998	09/11/1998	287.06000	124.67400	5
NOTNAMED	14/10/1924	23/10/1924	268.54000	136.28800	5

### 2.2.2 Parámetros del modelo

#### Depuración del catálogo de huracanes

A partir de la base de datos IBTrACS de la NOAA, se depuró el catálogo de huracanes de manera que sólo se tomaran en cuenta aquellos ciclones tropicales que han afectado el territorio de la República de Guatemala. Los criterios de depuración empleados fueron los siguientes:

- Eventos con categoría < H1 (119 km/h) en la escala Saffir-Simpson (SS).
- Eventos cuya trayectoria haya pasado en algún momento a menos de 200 Km del territorio de Guatemala.

#### *Océano Atlántico*

Los criterios anteriores aplicados a la base de datos de ciclones tropicales para el Océano Atlántico, permiten obtener un total de 77 huracanes con categoría  $\geq$  H1 SS. En la Tabla 6 se presenta la distribución, por categoría en la escala Saffir-Simpson, de los 77 huracanes que forman la base de datos depurada para el Océano Atlántico, cuya ocurrencia ha registrado algún nivel de intensidad de velocidad del viento en territorio guatemalteco, con categoría  $\geq$  H1 SS.

**Tabla 6**  
**Distribución por categoría en la escala Saffir-Simpson, de los ciclones tropicales considerados**

Categoría	Número de huracanes
H5	8
H4	8
H3	13
H2	24
H1	24



## Factores de exposición topográfica al viento para la República de Guatemala

Debido al efecto de la topografía del sitio en que se ubica una construcción, se presentan variaciones en la velocidad del viento generada por un huracán. Los factores de topografía permiten tomar en cuenta el incremento o decremento en la velocidad del viento debido a las características topográficas del sitio en que se ubica una construcción, por ejemplo en la cima de promontorios, terrenos inclinados, islas o valles cerrados. En este estudio, para tomar en cuenta las modificaciones a la velocidad del viento debido al efecto de la topografía circundante al sitio en que se ubica la construcción, se define un factor de incremento en la velocidad, el cual actúa como un multiplicador de la velocidad del viento considerada en terreno plano; estos factores de topografía se asignaron a partir de la determinación de áreas de exposición por viento (Avelar, 2006).

Para el cálculo de las áreas de exposición por viento se planteó un procedimiento que permite, a partir de Modelos Digitales de Elevación (MDE), obtener mapas digitales con valores del factor de topografía para Guatemala (ver Tabla 7). Para este fin se empleó el software *Factores de Exposición*, incluido dentro del software *FileCAT*<sup>2</sup>.

**Tabla 7**  
**Factores de exposición topográfica al viento para Guatemala**

Sitio	Topografía	Color	$F_T$
Protegido	Vallescerrados	Blanco	8
Plano	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5%	Gris	10
Expuesto	Cimas de promontorios, colinas o montañas, islas, terrenos con pendientes mayores que 5%	Negro	12

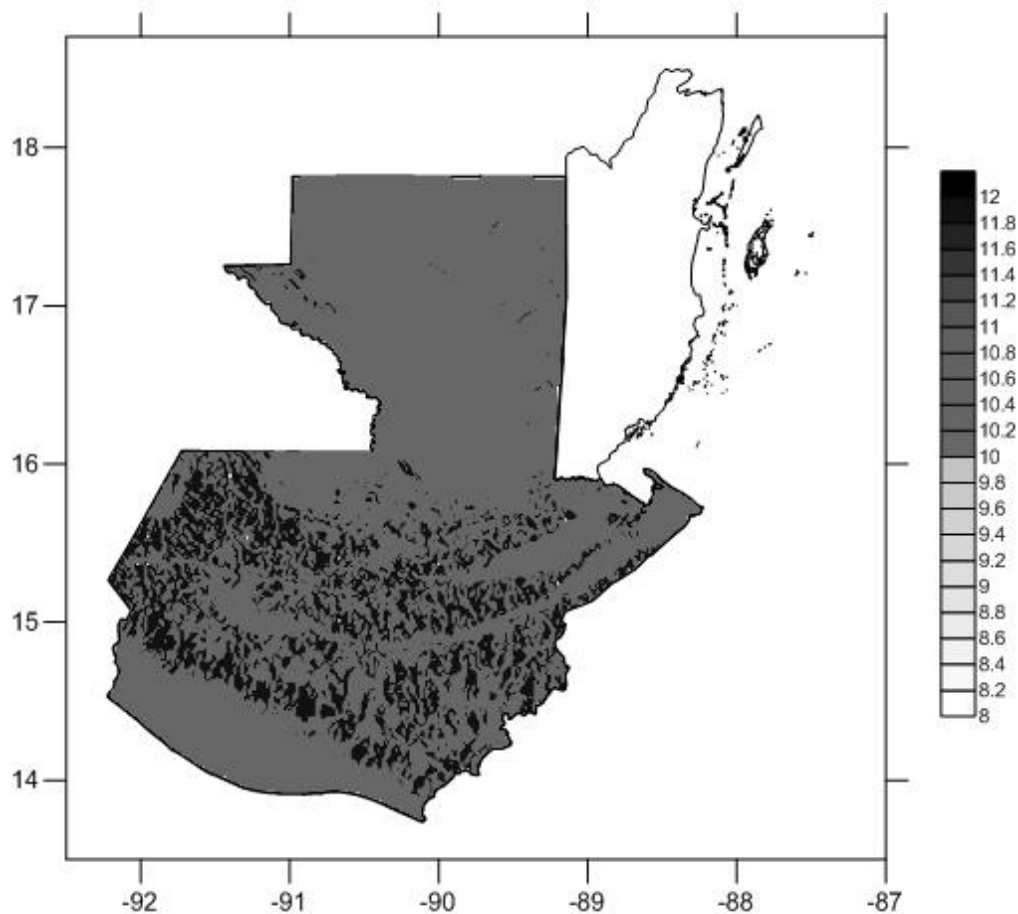
Estos factores se calculan para cada uno de los pixeles que conforman el MDE de acuerdo con su exposición al flujo de viento, localizados por las coordenadas geográficas de su centroide. Este

---

<sup>2</sup>FileCAT es un software gratuito y de libre distribución. Puede descargarse en la página [www.filecat.org](http://www.filecat.org)

tipo de información permite conocer el factor de topografía particular de la zona a evaluar, solo con conocer su ubicación geográfica.

Los factores de exposición al viento se pueden observar en la Figura 14, donde se establece la diferencia entre zonas protegidas, zonas expuestas y zonas planas.



**Figura 14**

Modelo digital de Factores de Exposición al viento

### **Variación de la velocidad del viento con la altura**

El movimiento de las masas de aire se ve restringido por la fricción con la superficie del terreno, lo cual origina que la velocidad sea prácticamente nula en contacto con el mismo y aumente con la altura hasta alcanzar la velocidad del flujo no perturbado, llamada *velocidad gradiente*.



Para un terreno muy liso, como es el caso de campo abierto con vegetación muy baja, el viento mantiene una velocidad muy alta aún muy cerca de la superficie, mientras que en el centro de grandes ciudades, con edificaciones altas, la velocidad disminuye rápidamente desde una altura de varias decenas de metros hasta la superficie del terreno. La expresión que permite obtener una estimación de la variación de la velocidad del viento con la altura y para diferentes tipos de terreno, se representa de la siguiente manera:

$$Fr_z = 1.56 \left( \frac{Z}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } 10 < Z < \delta$$

$$Fr_z = 1.56 \left( \frac{10}{\delta} \right)^\alpha \quad \text{si } Z \leq 10 \text{ m}$$

$$Fr_z = 1.56 \quad \text{si } Z \geq \delta$$

(Ec. 3-1)

donde:  $Z$  es la altura en metros a la cual se desea determinar la velocidad de viento. Los parámetros  $\alpha$  y  $\delta$  para tipos de terreno comunes en Guatemala se presentan en la Tabla 8.





**Tabla 8**  
**Parámetros  $\alpha$  y  $\delta$  para diferentes tipos de terreno**

Tipo	Descripción	$\alpha$	$\delta$ (m)
1	<b>Campo abierto plano</b> (terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones, por ejemplo franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin bardas alrededor)	0.099	245
2	<b>Árboles o construcciones dispersas</b> (campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones, por ejemplo bardas, árboles y construcciones dispersas)	0.128	315
3	<b>Arbolado, barrio residencial</b> (terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas, por ejemplo áreas urbanas, suburbanas y de bosques; el tamaño de las construcciones corresponde al de casas y viviendas)	0.156	390

4	<p><b>Muy accidentada, centro de ciudad</b></p> <p>(terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas como el centro de grandes ciudades y complejos industriales desarrollados)</p>	0.170	455
---	---	-------	-----

Para una altura de 10m sobre la superficie del terreno el mayor valor del factor  $Fr_z$  es de 1.137, el cual se presenta en terreno tipo 1 (terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones). El menor factor para una altura de 10 m corresponde a 0.815, el cual se presenta en terreno tipo 4 (terreno con numerosas obstrucciones). Una representación esquemática de los cuatro tipos de terreno se presenta en la Tabla 9.

**Tabla 9**  
**Representación de tipos de superficie del terreno**

 <p>1. Sin obstrucciones (ej. Puerto San José)</p>	 <p>2. Obstrucciones dispersas (ej. Totonicapán)</p>
 <p>3. Área sub-urbana (ej. Mixco)</p>	 <p>4. Área urbana (ej. Ciudad de Guatemala)</p>

### 2.2.3 *Calidad de los datos disponibles*

Para una correcta modelación de amenaza por huracán se debe tener una calidad de información adecuada en términos de resolución espacial y temporal. En cuanto a la resolución espacial de la información topográfica y de usos de suelo se considera que es buena y correcta para un nivel de análisis nacional en cuanto a la amenaza por viento huracanado.

En cuanto a la resolución temporal de la información referente a las trayectorias y características de los huracanes que han afectado el país se considera que es muy apropiada, debido a que abarca un período de medición comprendido entre 1866 y 2010.

En cuanto a la información topográfica, GLOBE es un proyecto continuo de recopilación de datos para el desarrollo de un modelo digital de elevación a nivel mundial, elaborado por la NOAA, en compañía de la National Geophysical Data Center y el Departamento de Comercio de Estados Unidos. Posee una resolución espacial de 30 segundos (aproximadamente 1 Km en el Ecuador), con una precisión vertical que varía entre 10 y 250 metros.

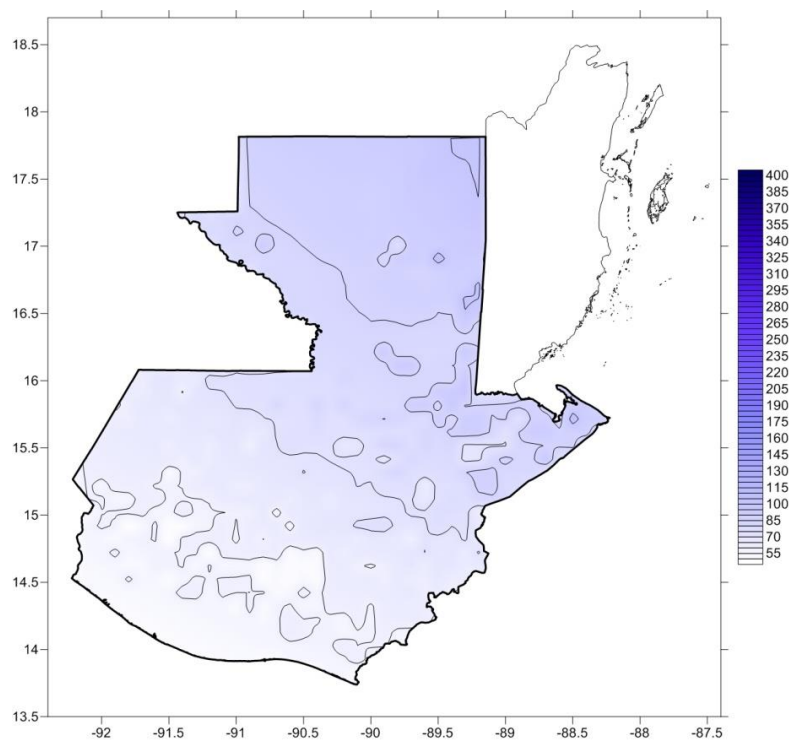
Debido a que GLOBE es una base de datos que pretende recopilar la mejor información topográfica a nivel mundial, existen diferentes tipos de sensores remotos que han contribuido a su construcción<sup>3</sup>.

### 2.2.4 *Mapas de amenaza por huracán en la República de Guatemala*

Se calcularon mapas de amenaza por vientos fuertes, tomando como medida de intensidad la velocidad pico de ráfagas de viento de 5 segundos de duración, y para periodos de retorno de 25, 50, 100, 250, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Huracán (ERN-AL 2009).

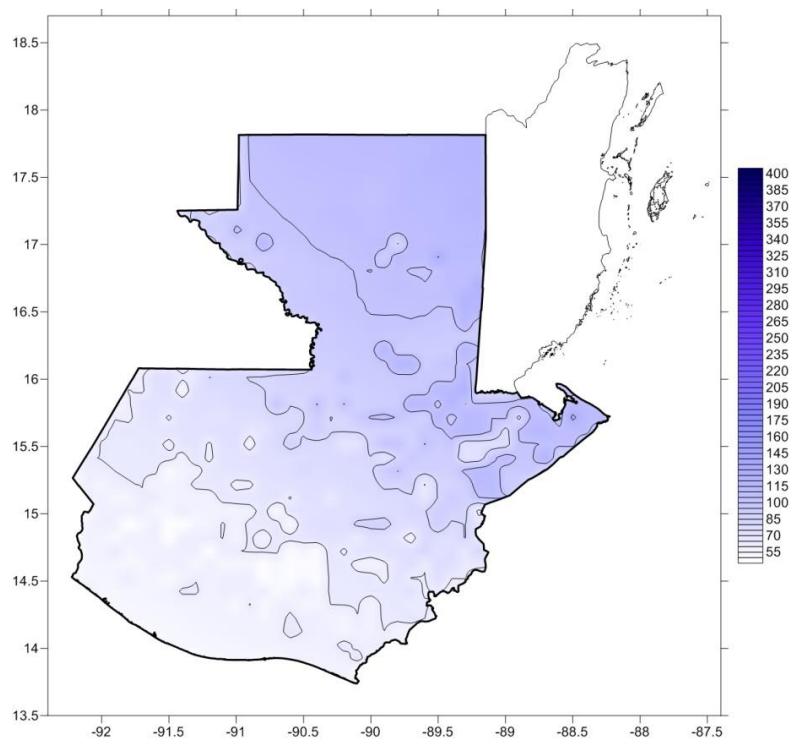
---

<sup>3</sup> Para mayor información visitar:  
<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/report/globedocumentationmanual.pdf>



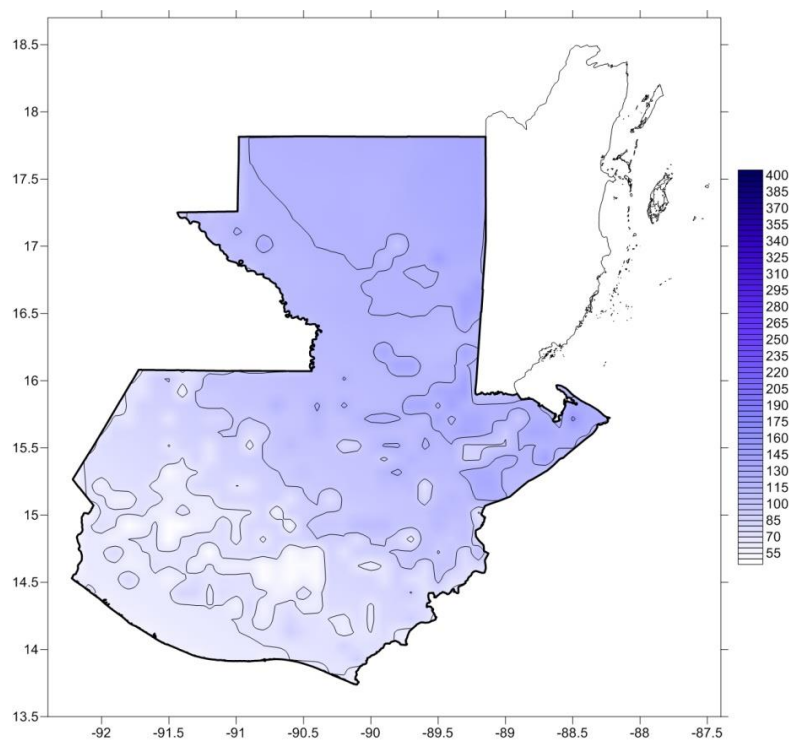
**Figura 15**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 25 años



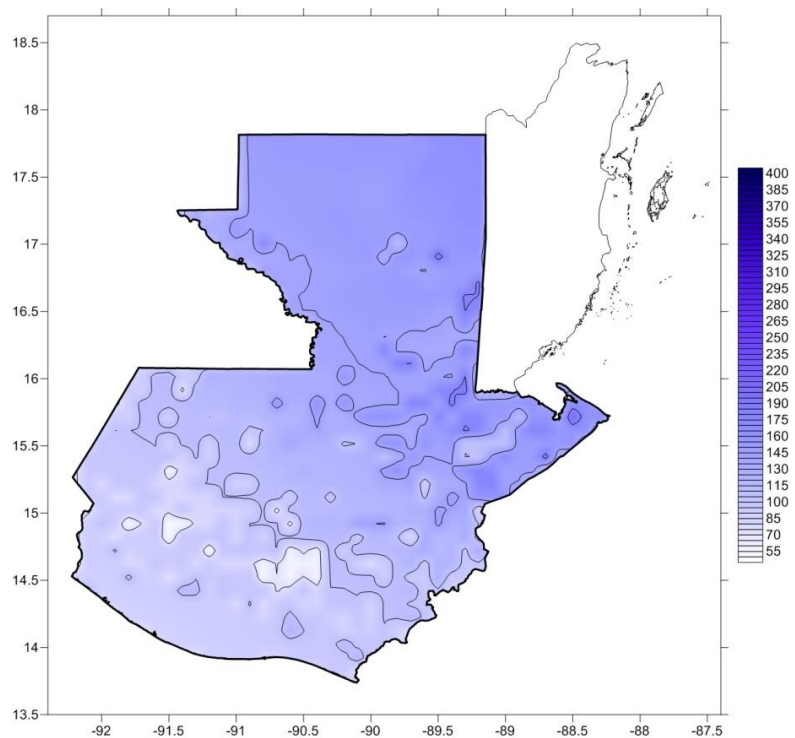
**Figura 16**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 50 años



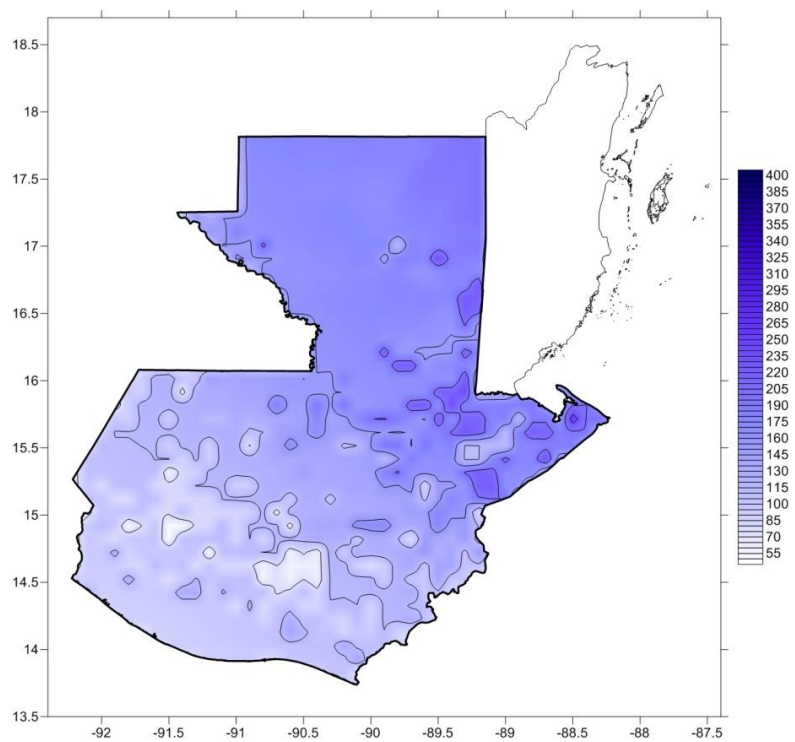
**Figura 17**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 100 años



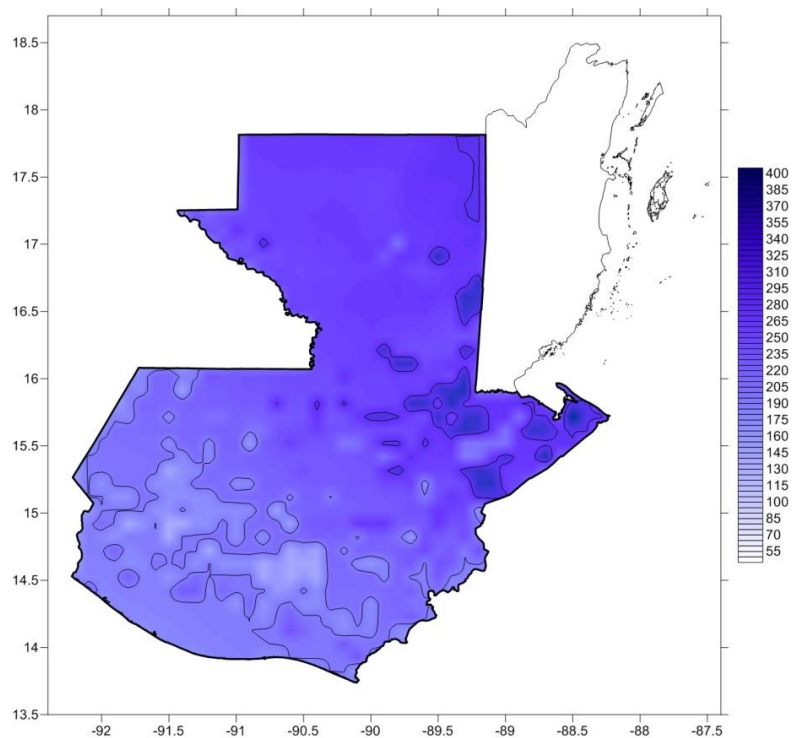
**Figura 18**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 250 años



**Figura 19**

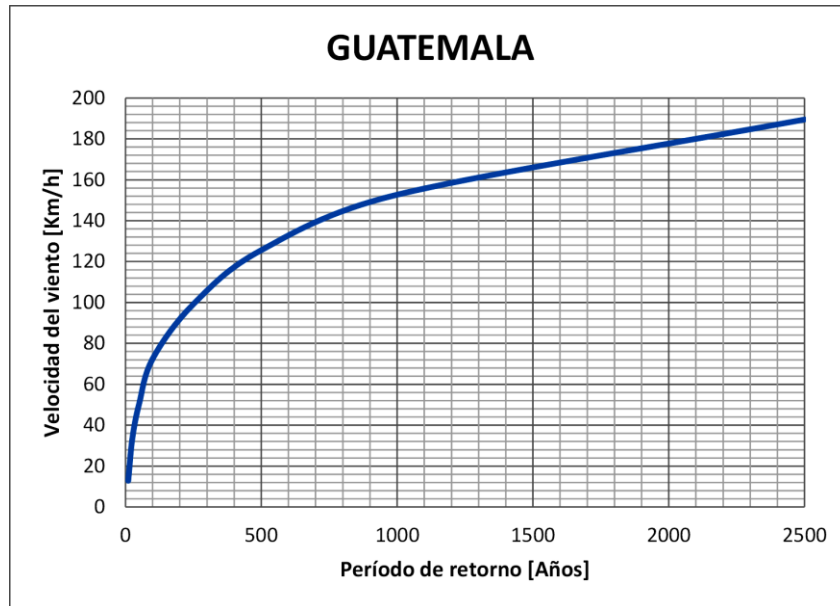
Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 500 años



**Figura 20**

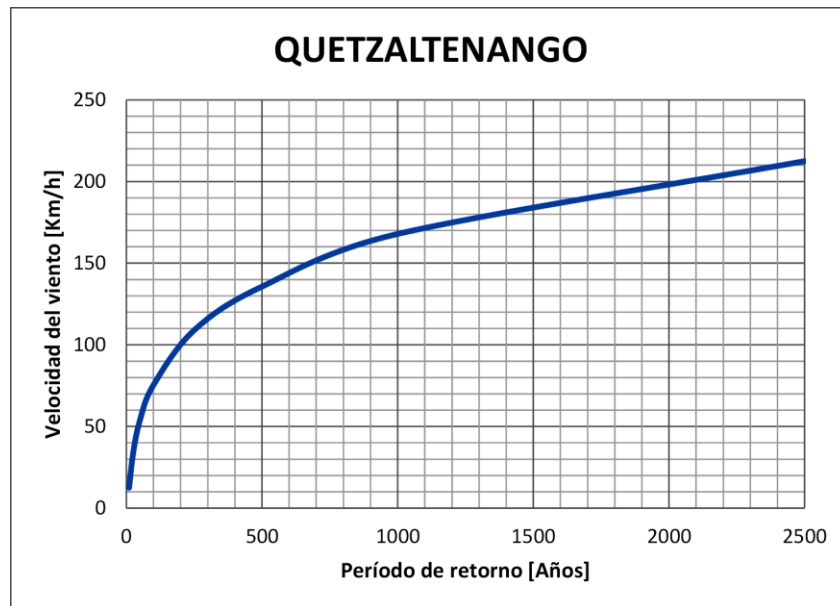
Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 1000 años

### 2.2.5 Curvas de amenaza



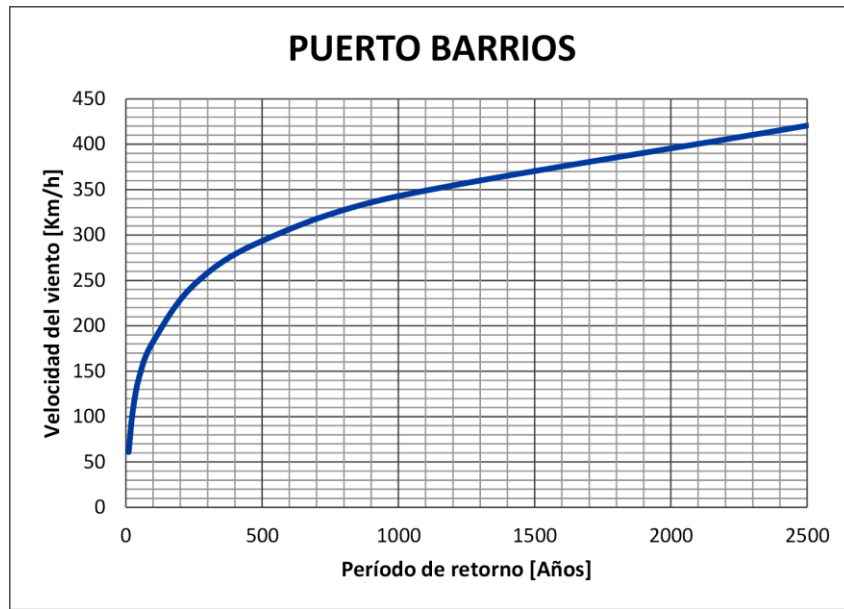
**Figura21**

Curva de amenaza para la ciudad de Guatemala. Velocidad del viento



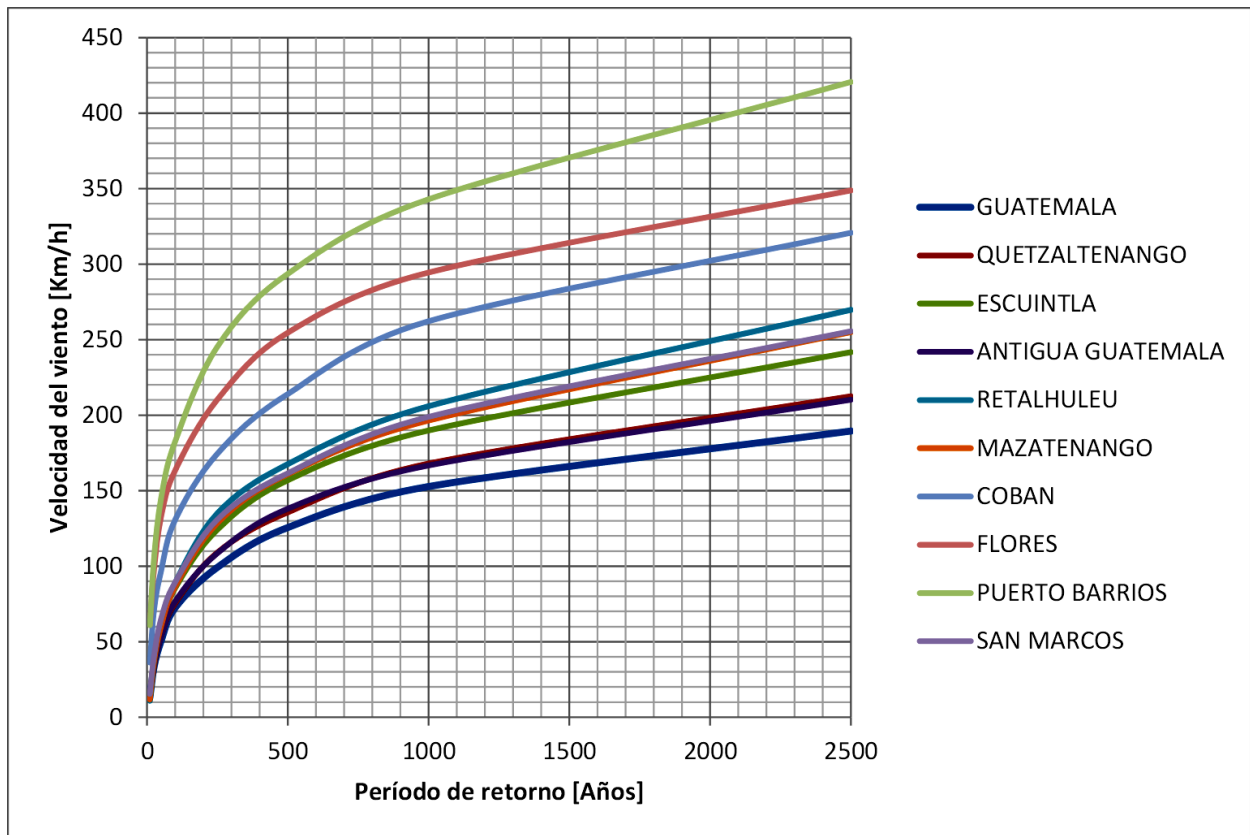
**Figura 22**

Curva de amenaza para Quetzaltenango. Velocidad del viento



**Figura 23**

Curva de amenaza para Puerto Barrios. Velocidad del viento



**Figura 24**

Curvas de amenaza para las principales ciudades de Guatemala. Velocidad del viento

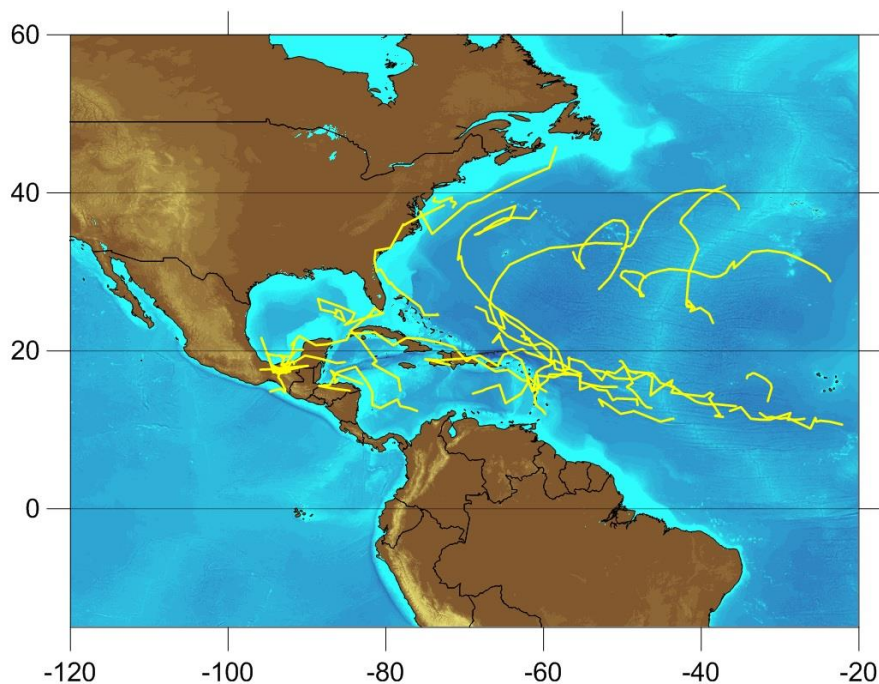


## 2.3 Evaluación de la amenaza por huracán, teniendo en cuenta cambio climático, para el período 1851-2055

### 2.3.1 Información empleada en la modelación

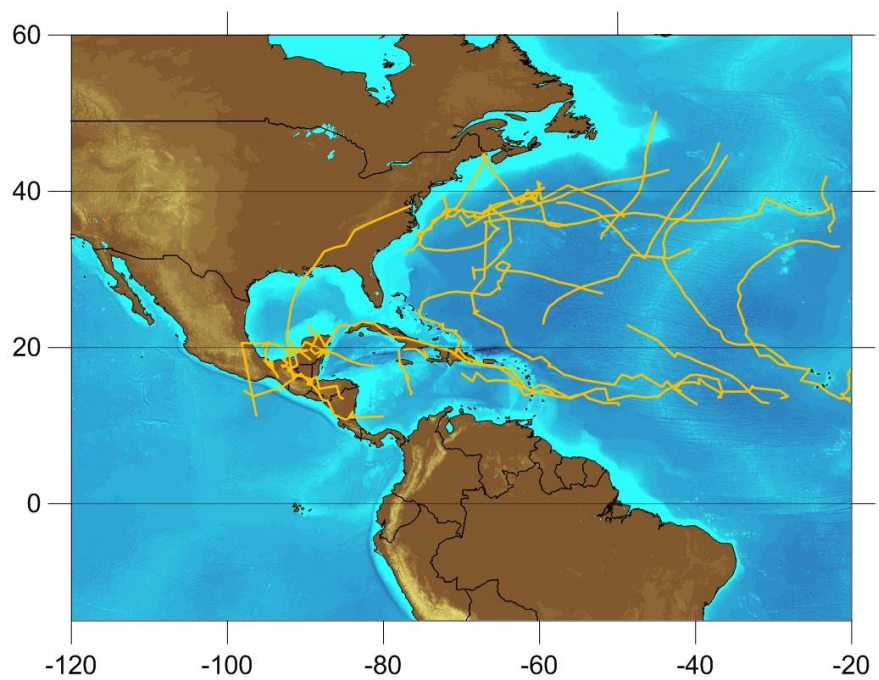
La información del modelo de amenaza empleada para el período 1851 – 2055 corresponde a la misma empleada en la evaluación de la amenaza por huracán para el período 1851-2010, en cuanto a la topografía, batimetría, áreas urbanas y uso de suelo. (Ver 2.2.1)

Con respecto al catálogo de huracanes empleado, el período 1851-2010 fue evaluado usando los eventos históricos que han tenido alguna afectación en el territorio de Guatemala. (Ver 2.2.1). El período 2010 – 2055 fue caracterizado mediante los eventos calculados por NCAR para los períodos 2010-2020 y 2045-2055. De la Figura 25 a la Figura 29 se presentan las trayectorias de los huracanes obtenidos por NCAR, diferenciados por categoría en el período 2020 – 2030. De la Figura 30 a la Figura 34 se presentan las trayectorias para el período 2045-2055.



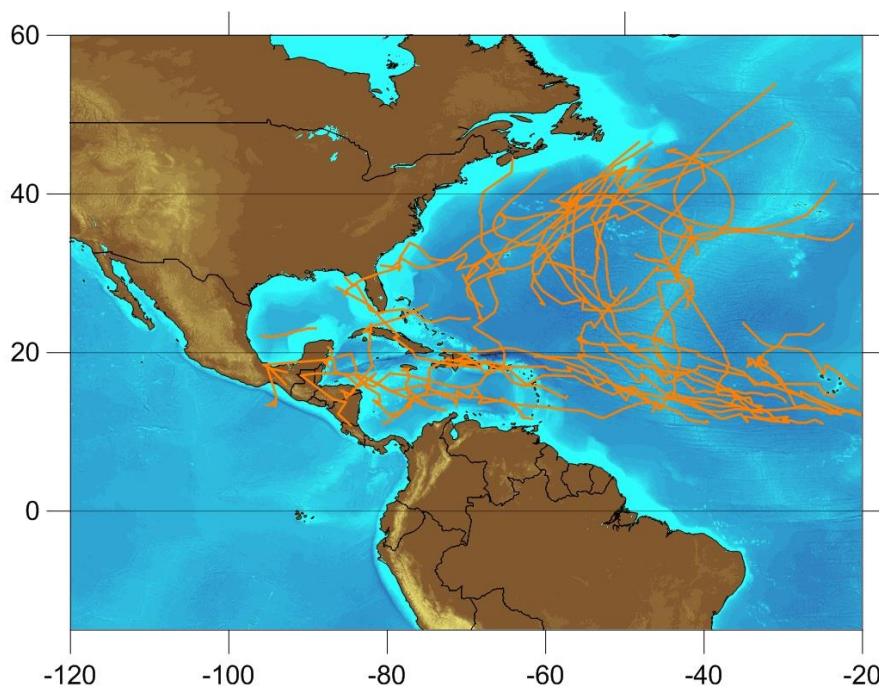
**Figura 25**

Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2020-2030. Categoría 1



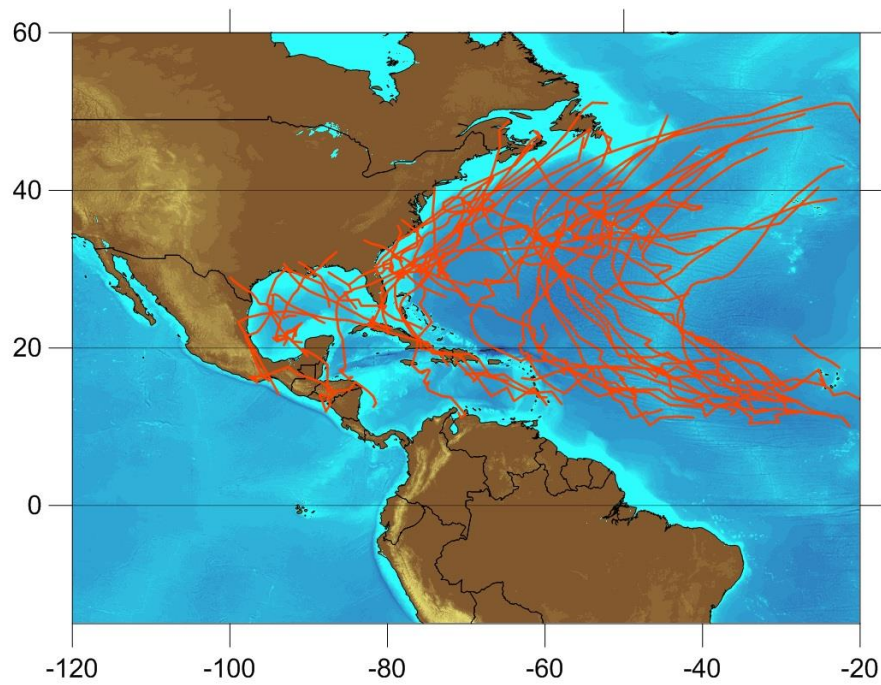
**Figura 26**

Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2020-2030. Categoría 2



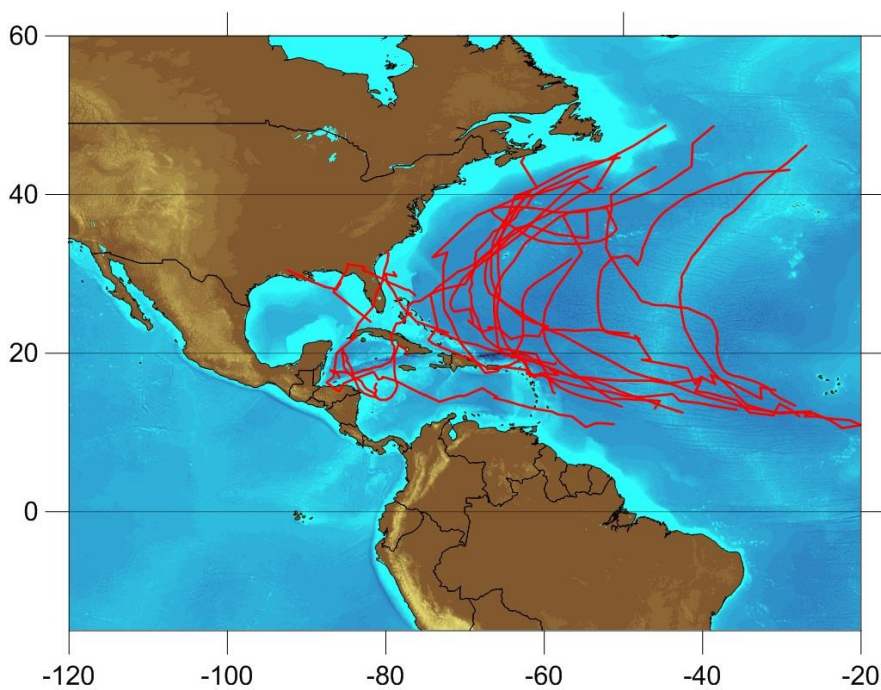
**Figura 27**

Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2020-2030. Categoría 3



**Figura 28**

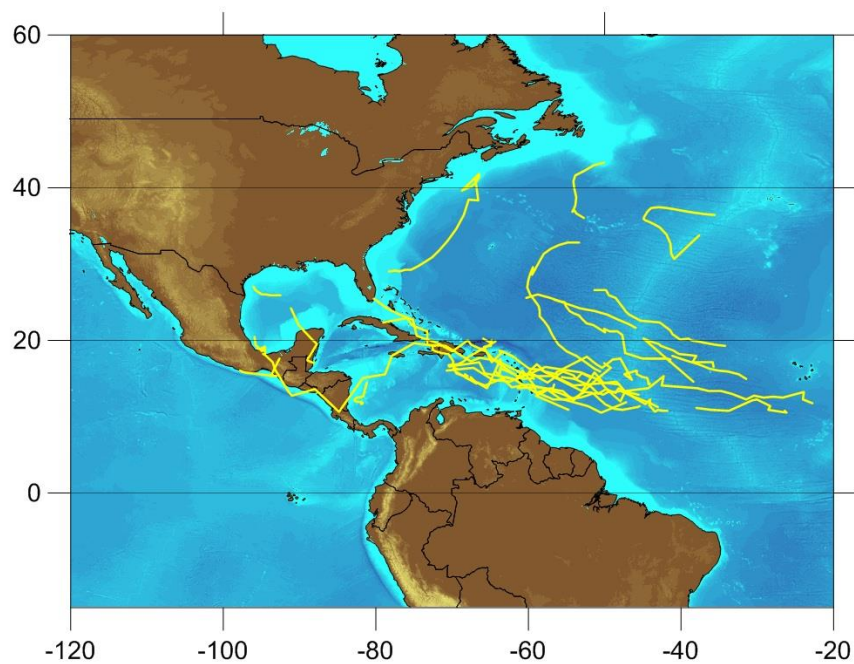
Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2020-2030. Categoría 4



**Figura 29**

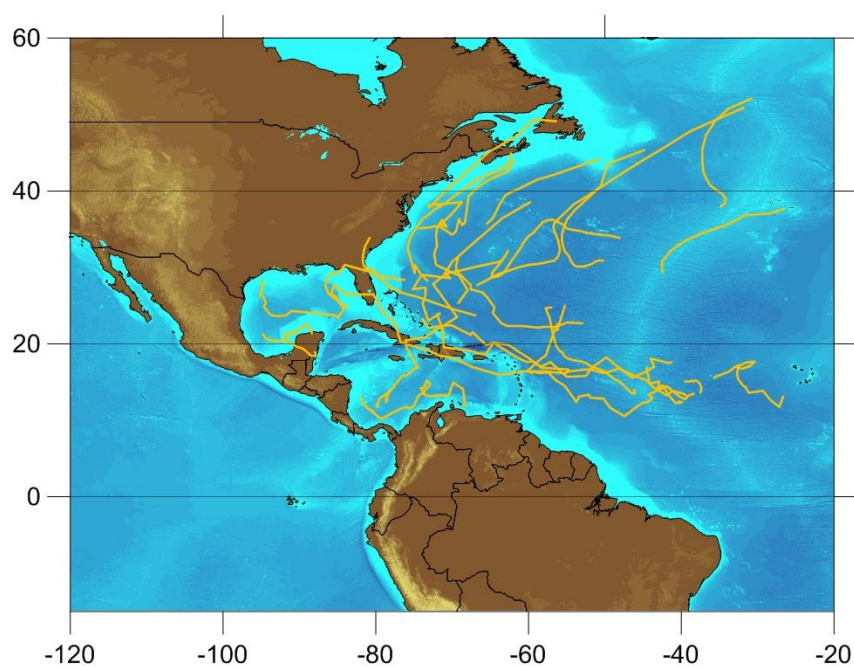
Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2020-2030. Categoría 5





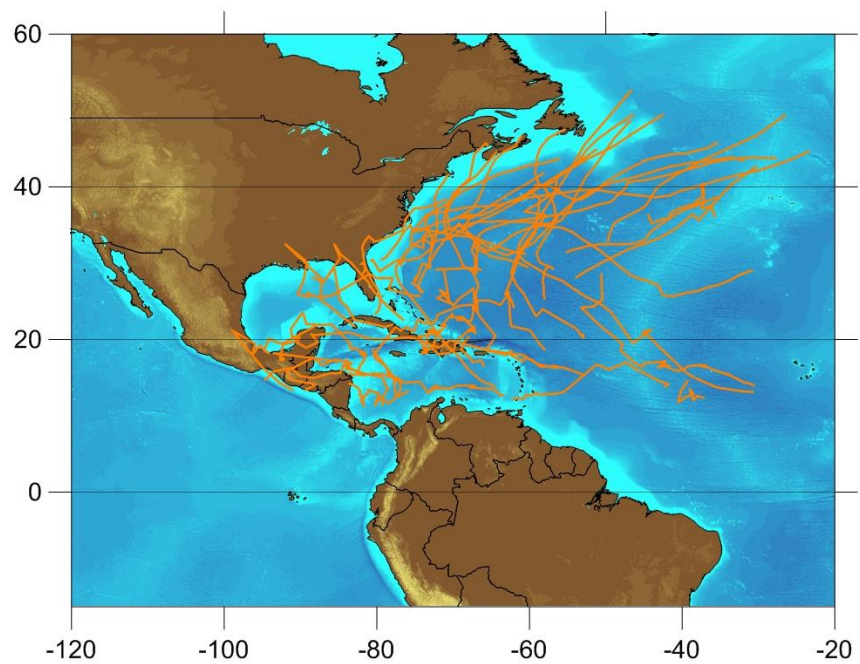
**Figura 30**

Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2045-2055. Categoría 1



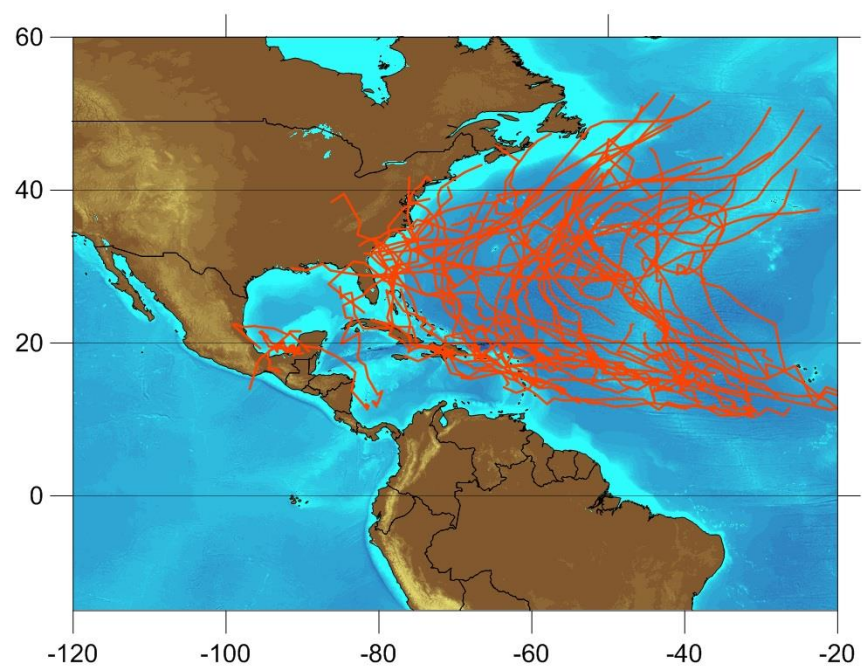
**Figura 31**

Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2045-2055. Categoría 2



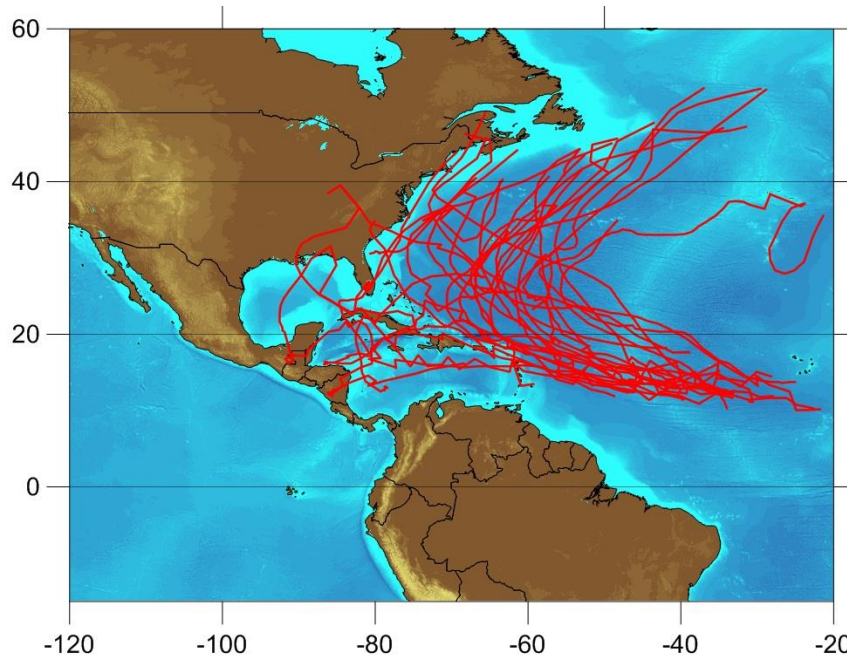
**Figura 32**

Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2045-2055. Categoría 3



**Figura 33**

Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2045-2055. Categoría 4



**Figura 34**

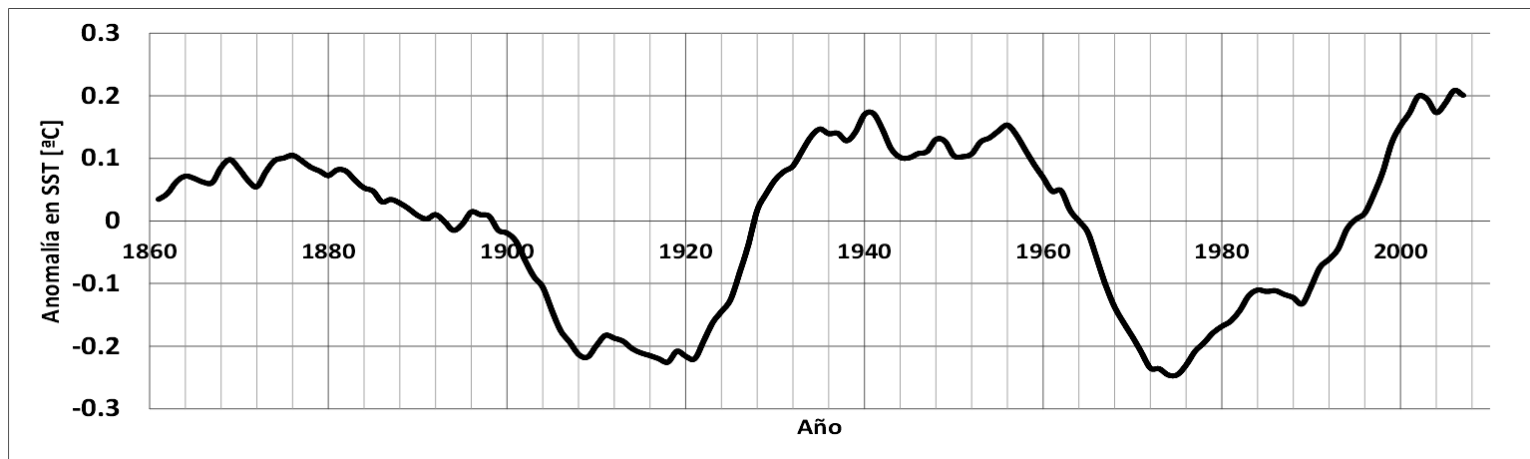
Huracanes NCAR para la cuenca del atlántico norte. Período 2045-2055. Categoría 5

Para la adecuada aplicación del modelo de cálculo de la amenaza por huracán, y la posterior aplicación de los resultados en un análisis de riesgo, es importante contar con un registro continuo y completo de huracanes en la cuenca del Atlántico Norte. La información recibida de parte de NCAR corresponde a trayectorias simuladas únicamente para las décadas 2020 a 2030 y 2045 a 2055. Por lo tanto, dentro del periodo que se debe caracterizar (2010-2055) se presenta un vacío de información para los períodos 2010 – 2020 y 2030 – 2045.

Dicho vacío en el catálogo de huracanes fue completado teniendo en cuenta los siguientes criterios:

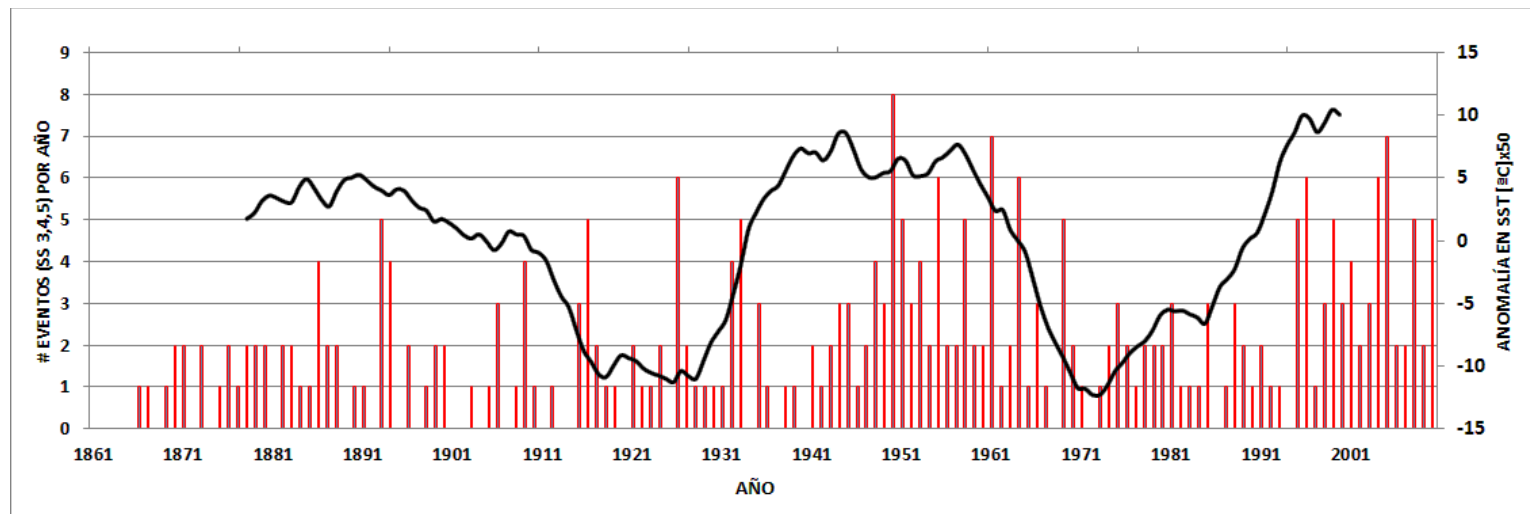
- Una de las causas de generación de huracanes es el incremento de la temperatura superficial de los océanos (SST, por sus siglas en inglés).
- La SST presenta una variación multidecadal (AMO), debido a la circulación termohalina de los océanos. (Ver Figura 35)

Mediante la relación de estos dos conceptos con la frecuencia histórica de generación de huracanes de gran intensidad (Categorías Saffir Simpson 3, 4 y 5), se evidencia que en las fases de anomalía positiva en la SST del **Atlántico Norte** se presenta una mayor cantidad de huracanes por año, mientras que en las fases de anomalía negativa en la SST se presenta una disminución en el número de huracanes por año. (Ver Figura 36).



**Figura 35**

Anomalía en SST (°C) calculada a partir de relaciones de Kaplan. Índice AMO

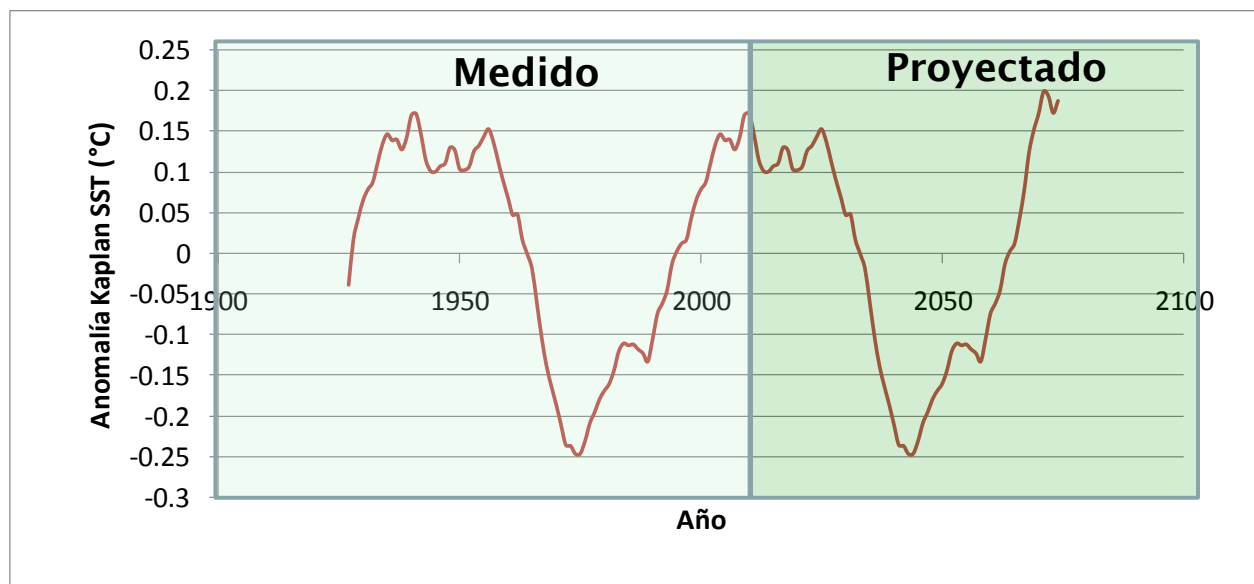


**Figura 36**

Relación Índice AMO vs. #Eventos de categoría 3, 4 y 5 en la escala Saffir - Simpson



Teniendo en cuenta la relación evidenciada en la Figura 36, se define una proyección del índice AMO hasta el año 2055. Esta proyección fue realizada mediante un análisis frecuencial sobre los datos históricos de anomalía de la SST. La transformada de Fourier de la serie temporal de dicha anomalía, contiene las amplitudes y frecuencias fundamentales de un conjunto suficientemente grande de funciones seno, cuya suma representa, en el dominio del tiempo, los valores de anomalía. Generando la suma de las funciones seno mencionadas, es posible estimar, en cualquier momento del tiempo, el valor de la anomalía. En la Figura 37 se verifica que, para el período 2000 a 2045, la SST del Atlántico Norte se encuentra en una fase de anomalía positiva.



**Figura 37**  
Proyección índice AMO

A partir de lo anterior, el catálogo de análisis fue completado mediante la adición de versiones perturbadas de huracanes históricos que se hayan presentado en una fase de anomalía positiva de SST. Los períodos escogidos son la década de 2000 a 2010, para completar el catálogo para el período 2010 a 2020, y el período 1940 a 1955, para completar el catálogo en el período comprendido entre 2030 y 2045.

Debido a que la probabilidad de que las trayectorias históricas escogidas para completar el catálogo tengan una misma trayectoria en el futuro es muy baja, se aplica la teoría de perturbación mediante el uso de la técnica “randomwalk”. Lo anterior se realiza con el fin de

generar un análisis exhaustivo que tenga en cuenta todas las posibles trayectorias que pueden afectar a la República de Guatemala en el período de análisis comprendido entre 2010 – 2055.

### 2.3.2 *Calidad de los datos disponibles*

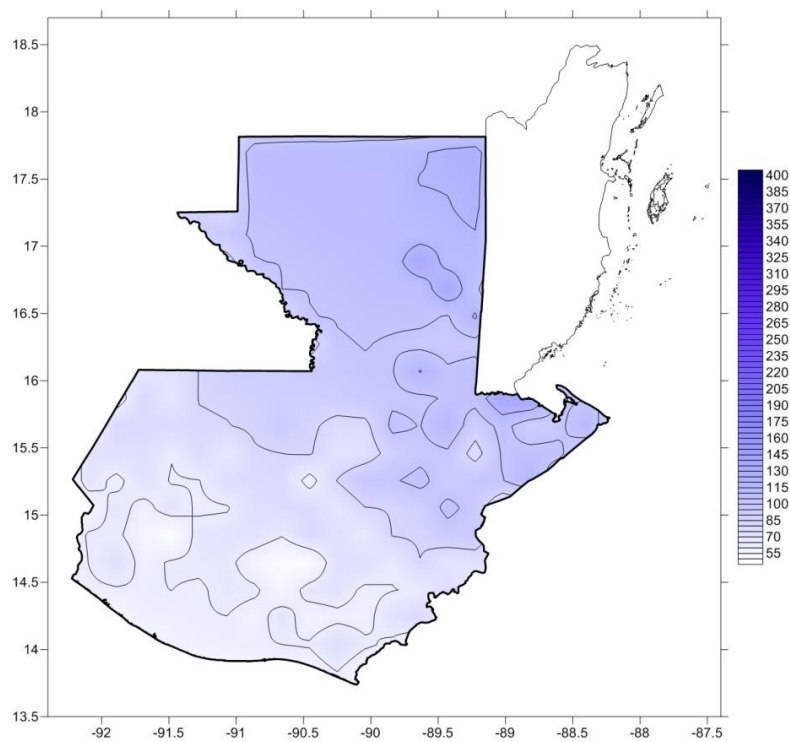
La modelación climática en diferentes escalas espaciales es un proceso que tiene en cuenta numerosas variables que permiten estimar en diferentes zonas de interés el *comportamiento predominante* del clima. Los modelos desarrollados hasta el momento en el mundo para obtener dicha información con algún nivel de confianza, tienen resoluciones espaciales variables (para el caso del modelo empleado en este proyecto, la resolución espacial es de 12x12 Km).

Si bien la resolución espacial usada por el modelo de NCAR para la generación y modelación de huracanes en la cuenca del Atlántico Norte, es adecuada para un análisis a nivel país, se debe tener en cuenta que los huracanes son eventos recurrentes que corresponden a fenómenos meteorológicos y no a fenómenos predominantes en una escala global (climática), como sí lo es el cambio climático.

Por lo tanto, se debe entender que la precisión de los modelos climáticos para interpretar y modelar eventos netamente meteorológicos es baja. Lo anterior no quiere decir que los resultados obtenidos no sean aceptables, ya que si bien las trayectorias generadas por NCAR en algunos casos desafían las condiciones naturales de un huracán, son útiles para tener en cuenta los efectos predominantes en términos de velocidad del viento a una escala nacional.

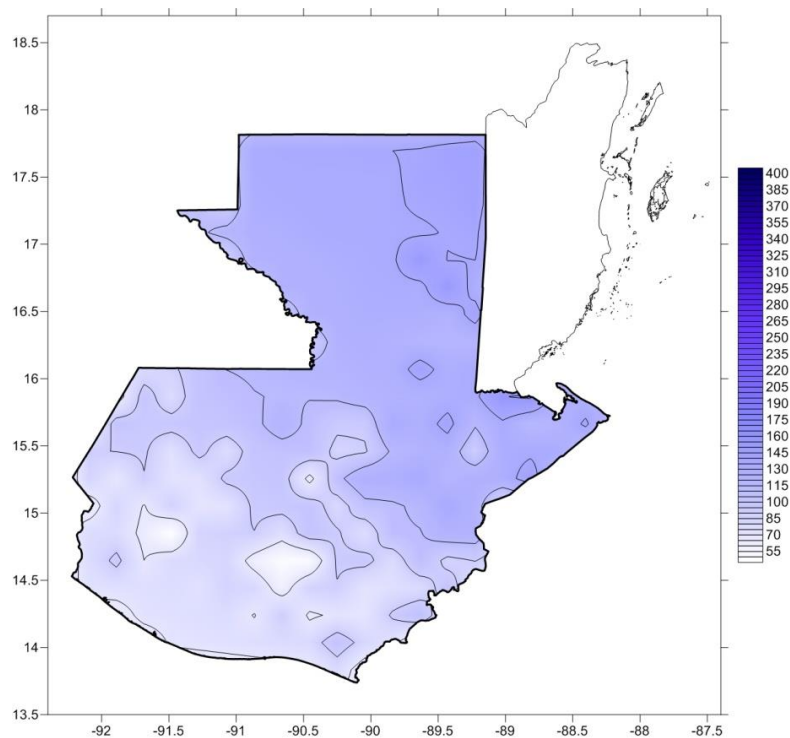
### 2.3.3 *Mapas de amenaza por huracán en la República de Guatemala, teniendo en cuenta efectos de cambio climático*

Se calcularon mapas de amenaza por vientos fuertes, tomando como medida de intensidad la velocidad pico de ráfagas de viento de 5 segundos de duración, y para periodos de retorno de 25, 50, 100, 250, 500 y 1000 años. Los cálculos fueron realizados empleando el programa ERN-Huracán (ERN-AL 2009).



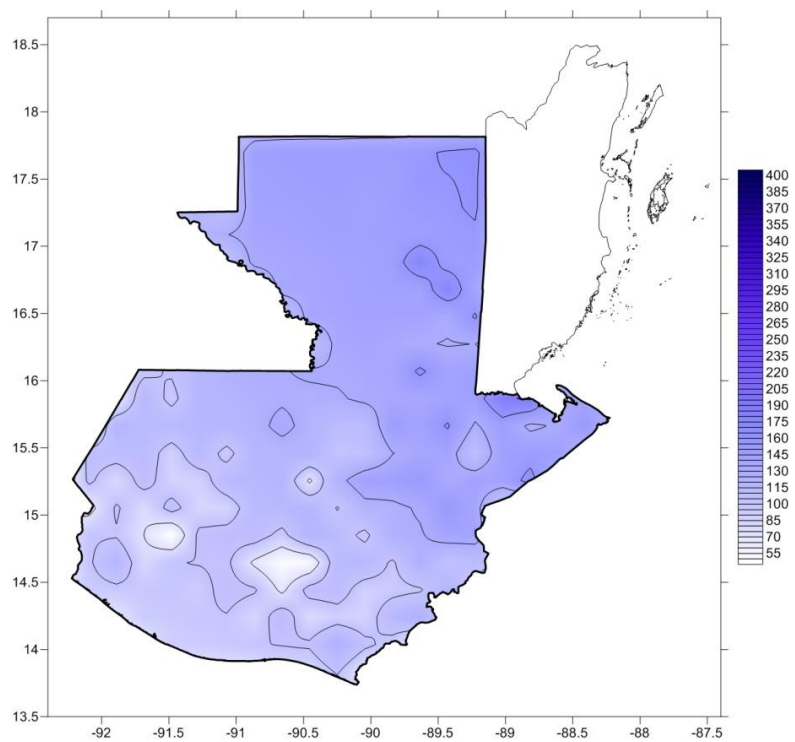
**Figura 38**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 25 años



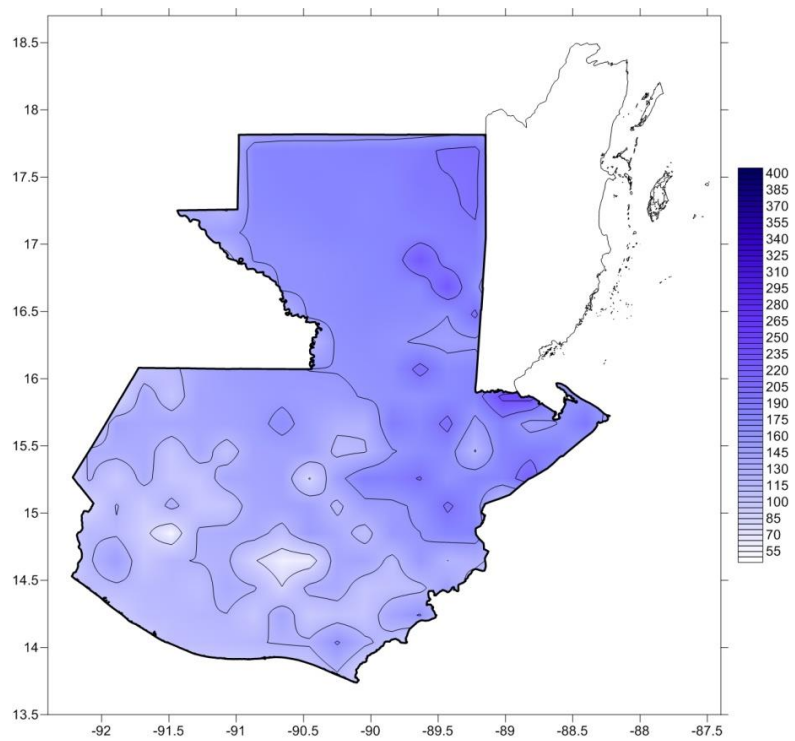
**Figura 39**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 50 años



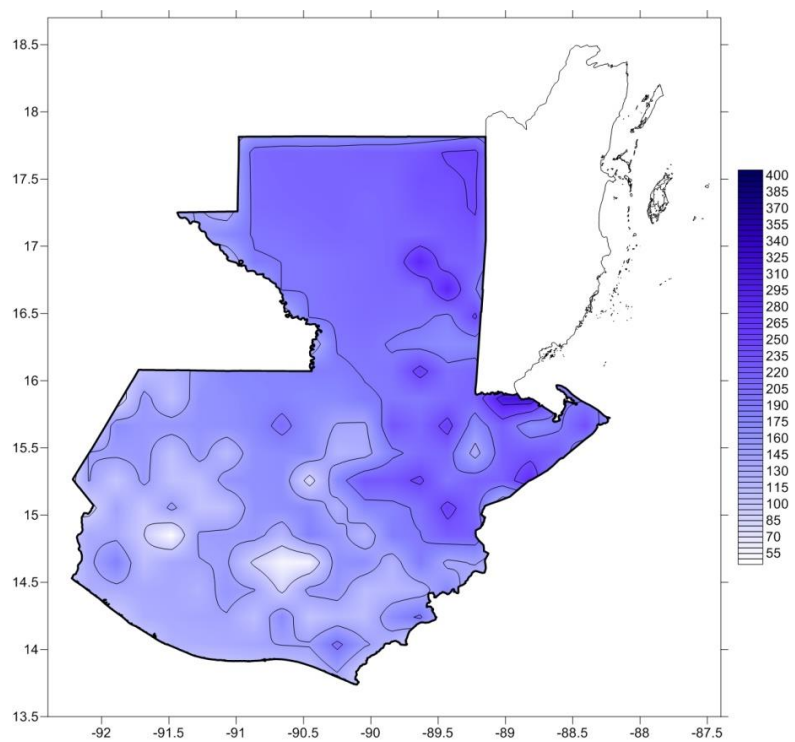
**Figura 40**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 100 años



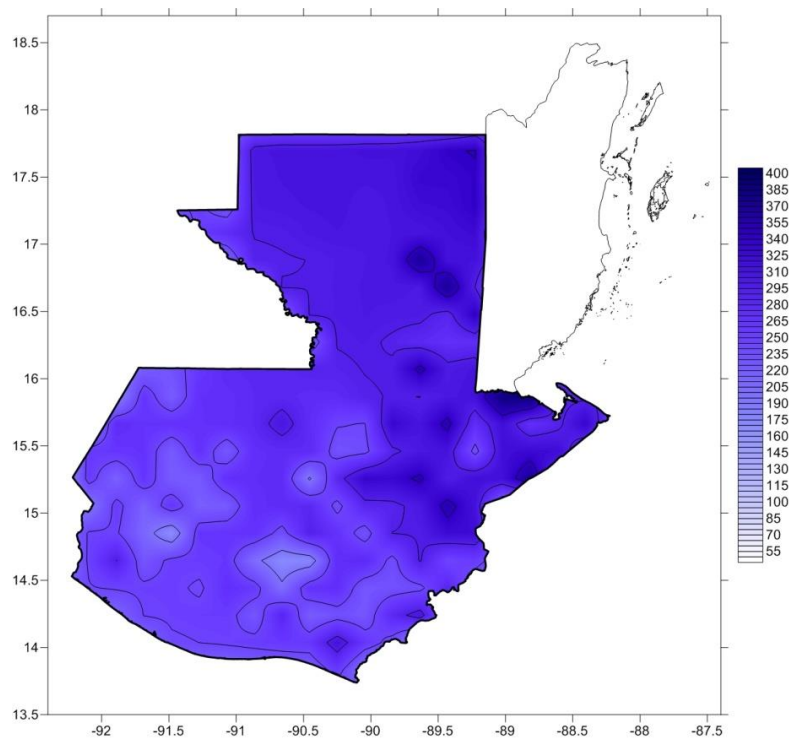
**Figura 41**

Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 250 años



**Figura 42**

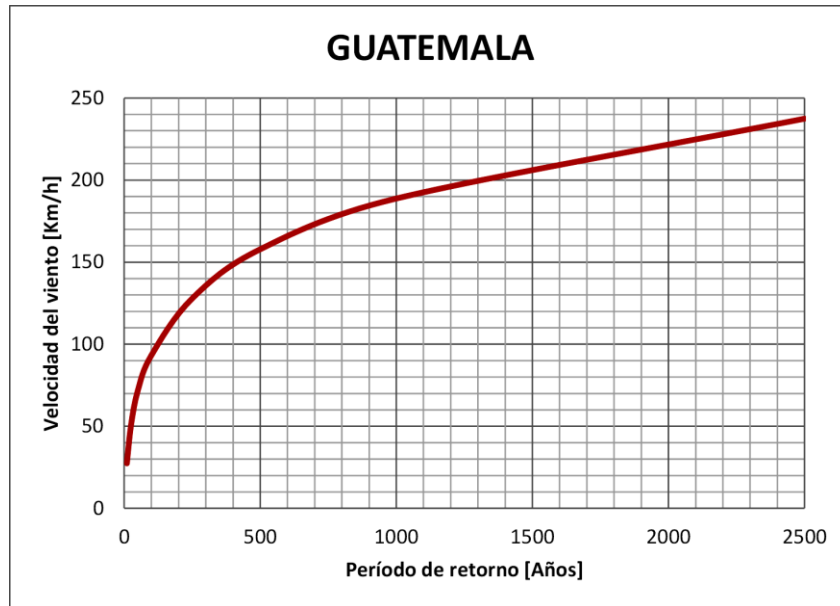
Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 500 años



**Figura 43**

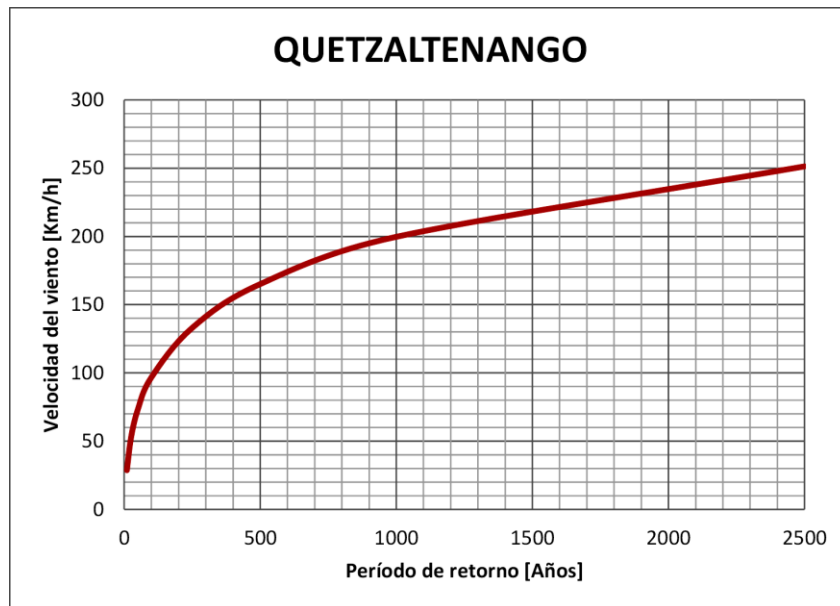
Mapa de amenaza por huracán. Velocidad del viento [Km/h]. Tr: 1000 años

### 2.3.3.1 *Curvas de amenaza*



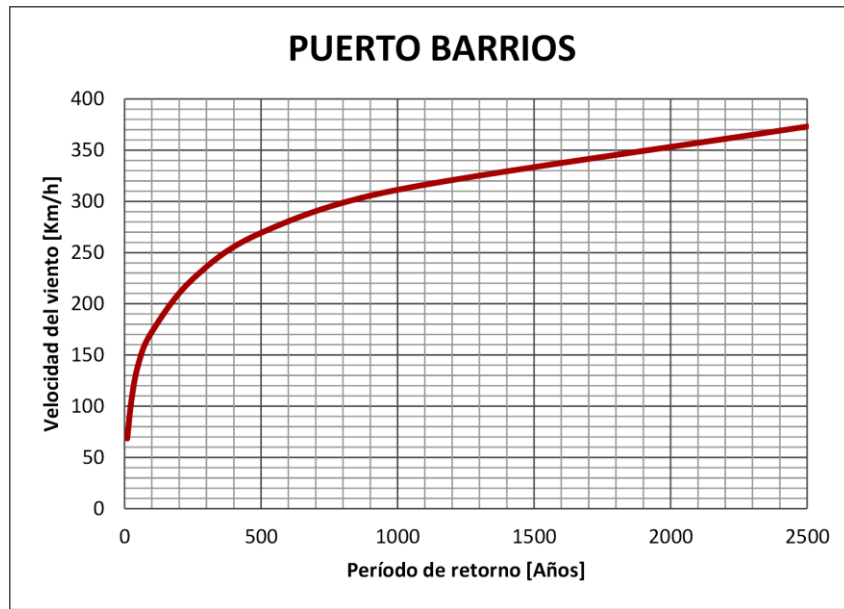
**Figura 44**

Curva de amenaza para la ciudad de Guatemala. Velocidad del viento



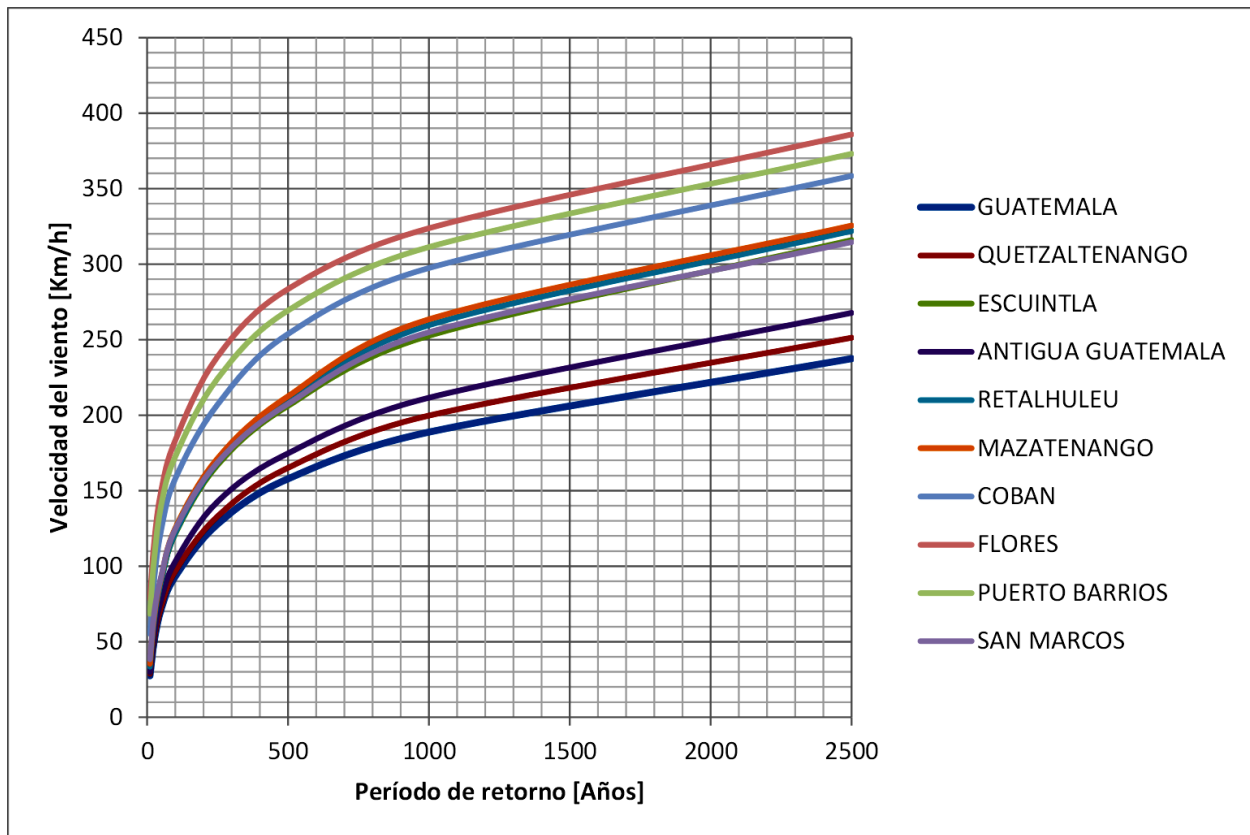
**Figura 45**

Curva de amenaza para Quetzaltenango. Velocidad del viento



**Figura 46**

Curva de amenaza para Puerto Barrios. Velocidad del viento



**Figura 47**

Curvas de amenaza para las principales ciudades de Guatemala. Velocidad del viento

### 3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA AMENAZA POR HURACÁN PARA EL PERÍODO 1995 – 2005

Este análisis se realizó con el fin de ilustrar las diferencias en los resultados obtenidos mediante el cálculo de la amenaza teniendo en cuenta los eventos históricos reales ocurridos en la cuenca del Atlántico Norte, en comparación con los resultados para eventos sintéticos obtenidos a partir de la interpretación y análisis del modelo climático, efectuado por NCAR. El análisis se realiza para las ciudades de Ciudad de Guatemala y Puerto Barrios (ver desde Figura 48 a Figura 57 respectivamente).

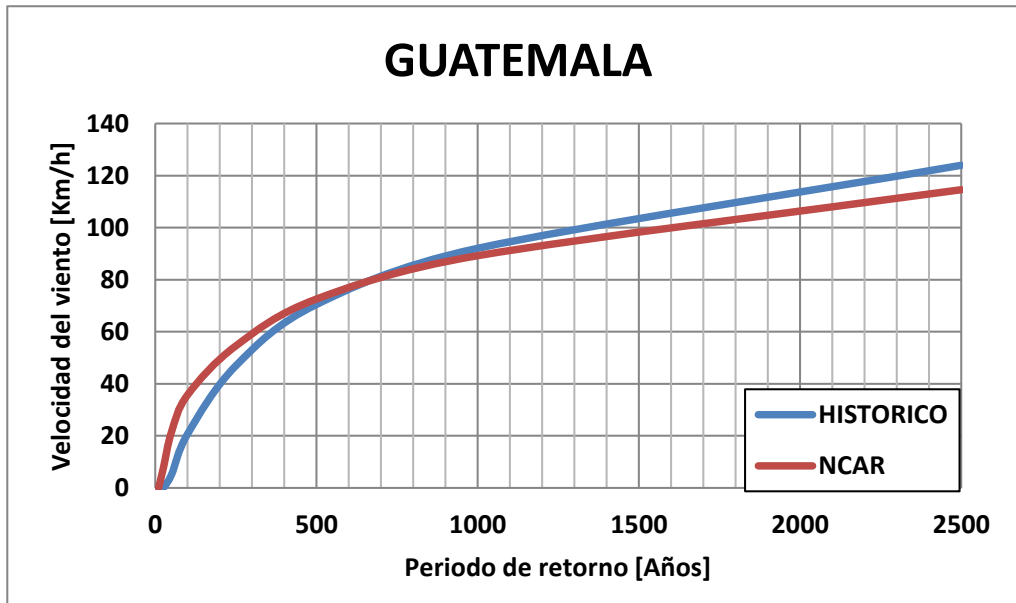
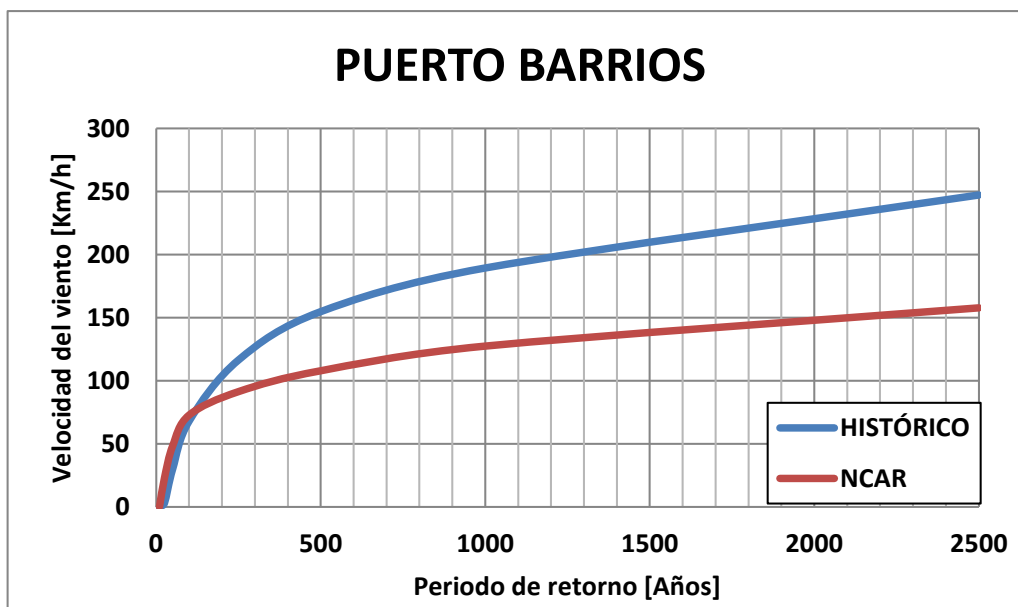


Figura 48

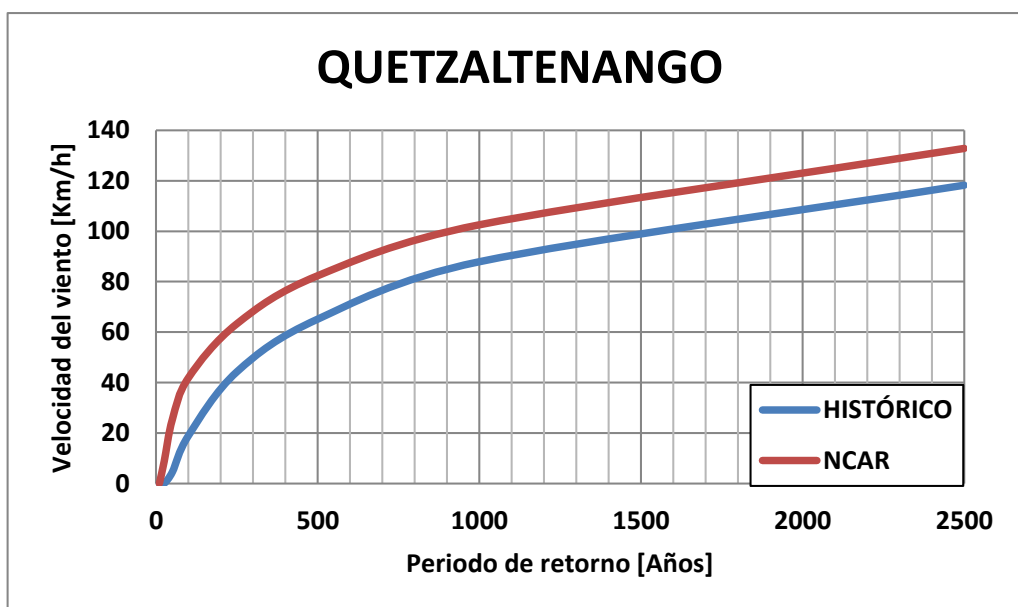
Curvas de amenaza para Ciudad de Guatemala. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]





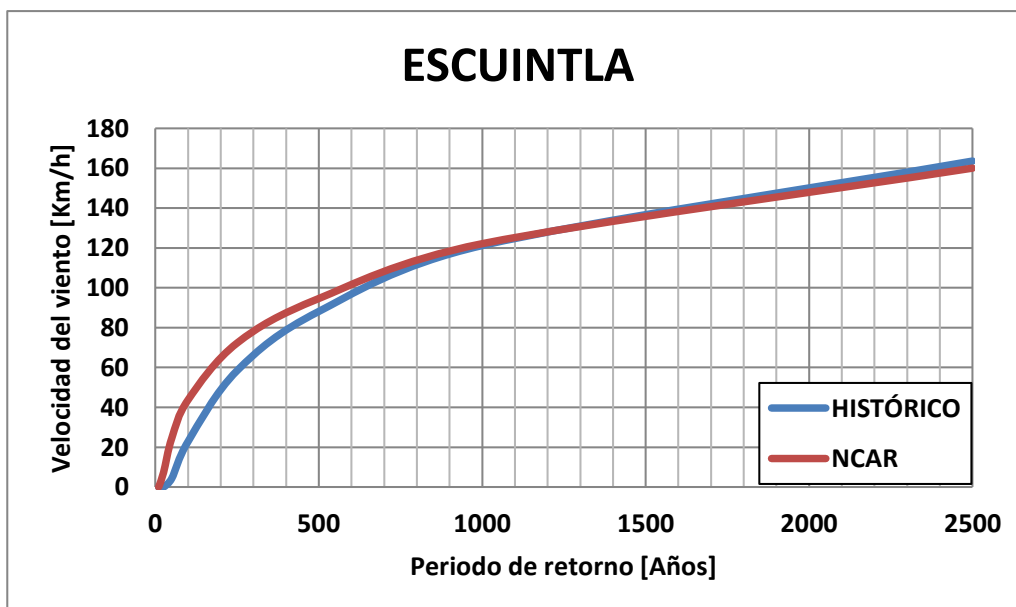
**Figura 49**

Curvas de amenaza para Puerto Barrios. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



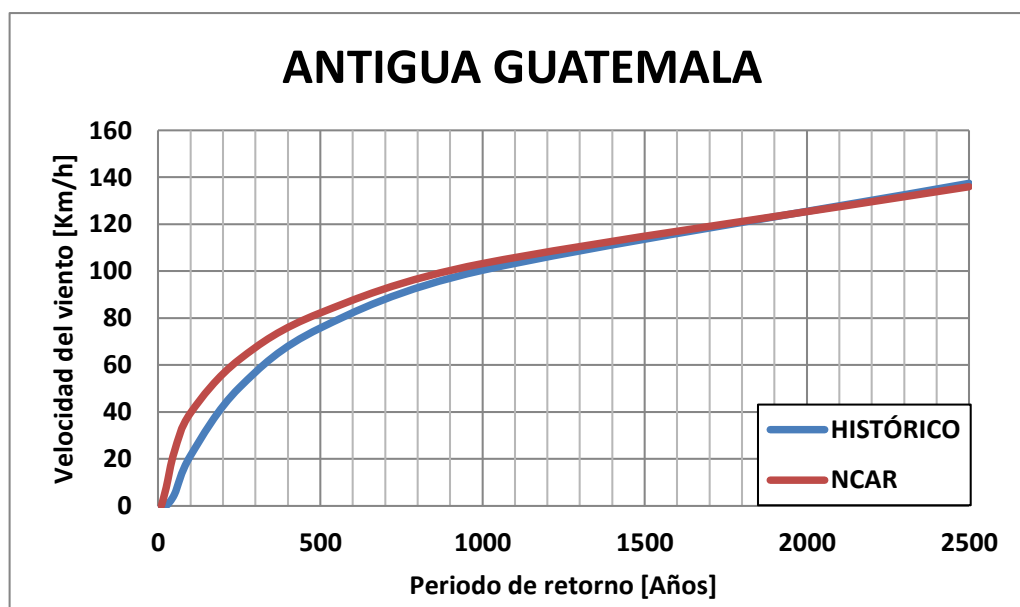
**Figura 50**

Curvas de amenaza para Quetzaltenango. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



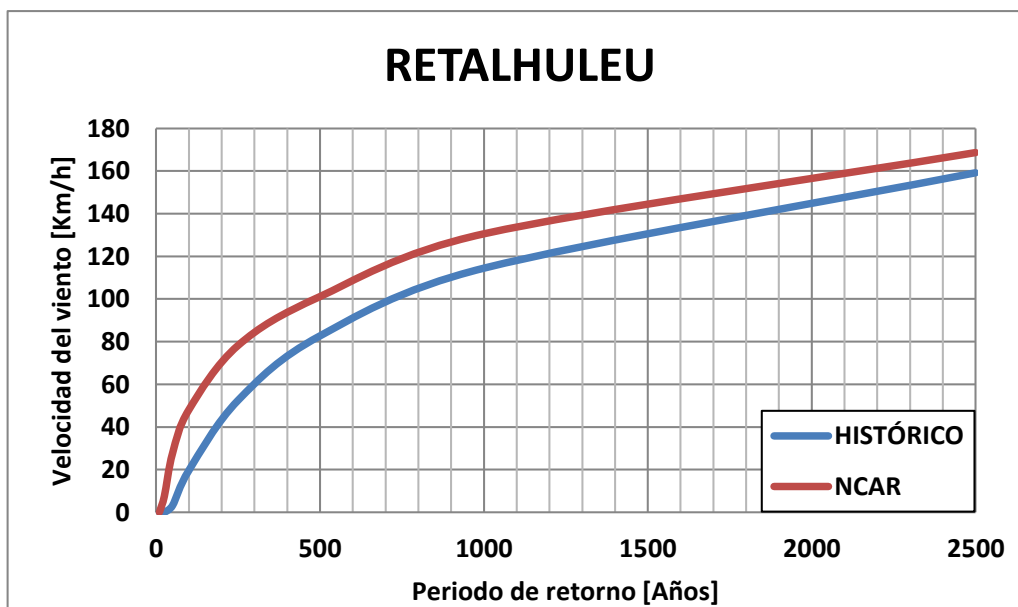
**Figura 51**

Curvas de amenaza para Escuintla. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



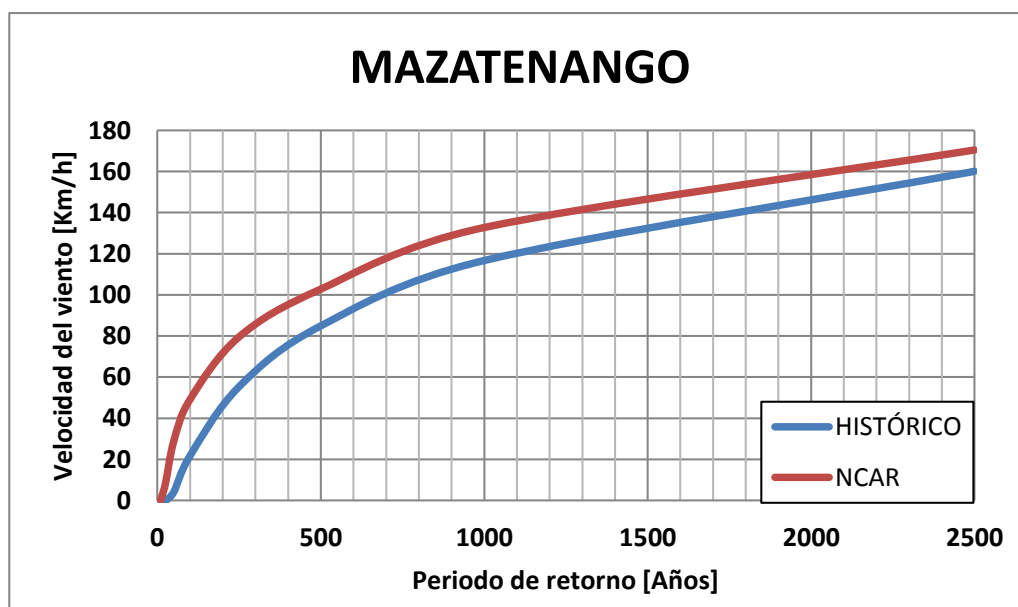
**Figura 52**

Curvas de amenaza para Antigua Guatemala. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



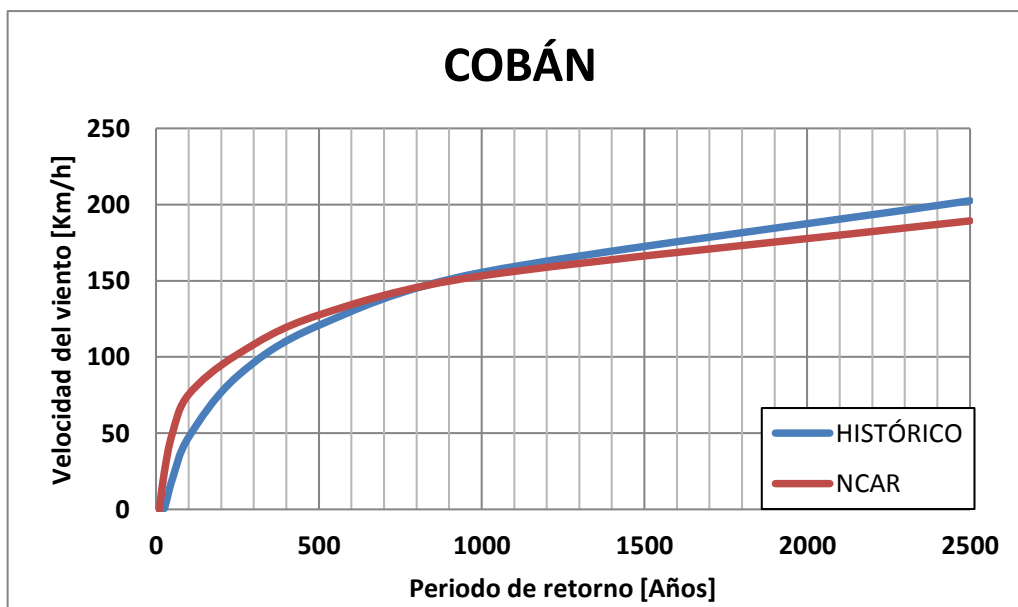
**Figura 53**

Curvas de amenaza para Retalhuleu. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



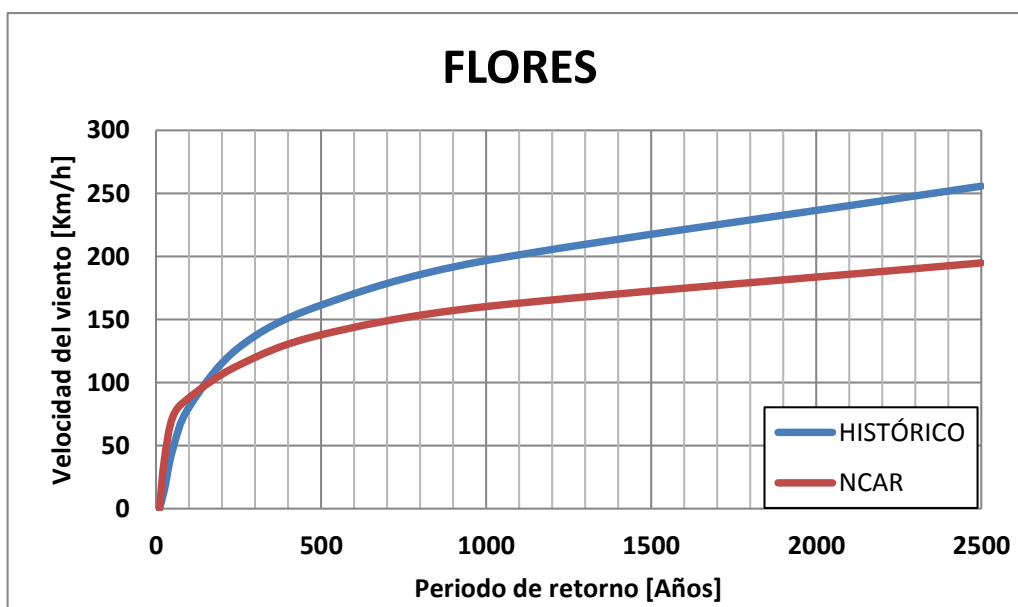
**Figura 54**

Curvas de amenaza para Mazatenango. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



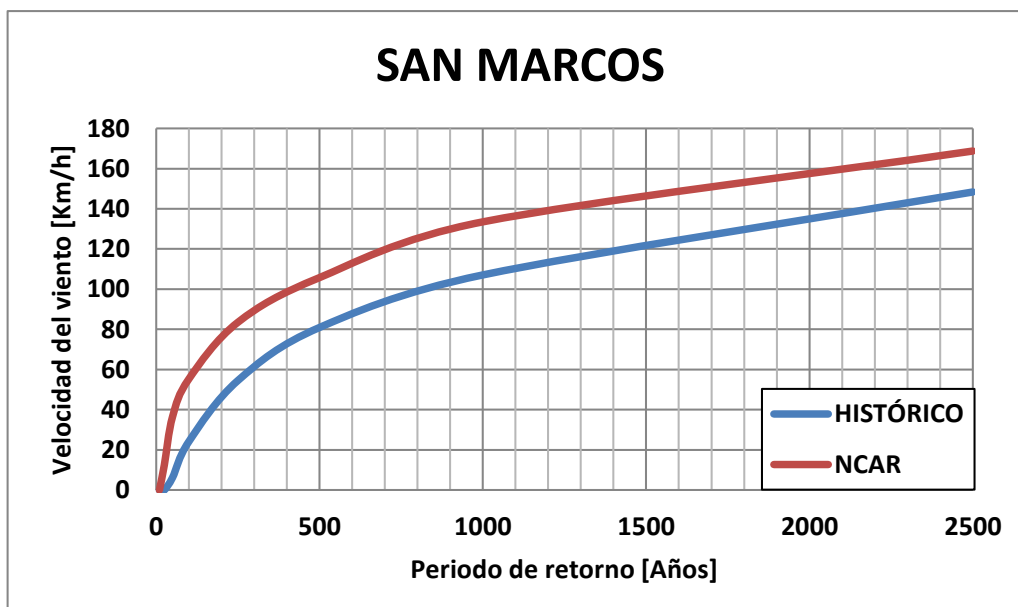
**Figura 55**

Curvas de amenaza para Cobán. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



**Figura 56**

Curvas de amenaza para Flores. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]



**Figura 57**

Curvas de amenaza para San Marcos. Eventos históricos vs. Eventos NCAR [1995-2005]

Es posible observar que para ciudades como Ciudad de Guatemala, Escuintla, Antigua Guatemala o Cobán, las curvas obtenidas considerando eventos históricos y los simulados por NCAR, son similares. Esto indicaría, en primera medida, algún tipo de consistencia entre el modelo NCAR y la historia de ciclones tropicales en el Atlántico Norte. Sin embargo, al hacer la comparación de las curvas de amenaza para Puerto Barrios, por ejemplo, se observa una diferencia muy marcada entre los resultados para períodos de retorno superiores a 100 años.

Adicionalmente, para ciudades como San Marcos, Mazatenango, Retalhuleu y Quetzaltenango, localizadas al occidente del país en la llanura costera junto al océano pacífico, el cálculo con las trayectorias simuladas por NCAR conduce a mayores valores de velocidad del viento, comparativamente con los niveles alcanzados empleando solamente las trayectorias históricas. Lo anterior indica que para zonas cercanas al océano pacífico y con una topografía característica de protección de vientos de oriente a occidente, la consistencia entre el modelo NCAR y la historia de ciclones tropicales en el Atlántico Norte disminuye.

Las diferencias mostradas son las esperadas al aplicar modelos de variabilidad climática global para simular fenómenos meteorológicos en escala local. Los modelos climáticos son de alta complejidad debido al gran número de variables involucradas y sus interrelaciones. Los resultados de modelos de este tipo deben ser entendidos como de *dependencia sensible*, es decir, que al modificar levemente alguno de los parámetros de entrada del modelo, el resultado puede cambiar drásticamente. En otras palabras, los modelos de predicción global del clima son adecuados para la predicción de órdenes generales de variabilidad climática (p. e. número de tormentas al año, temperatura media del mar, etc.), pero no para la modelación de fenómenos puntuales. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se puede afirmar que es prácticamente imposible que de un modelo climático, aplicado a escala meteorológica, se obtenga una historia de ciclones que reproduzca lo observado a escala local.

Es importante aclarar que no es incorrecto emplear modelos climáticos para la predicción de fenómenos meteorológicos a escala local, simplemente esto debe realizarse con mucha reserva y sin perder la perspectiva del nivel de incertidumbre asociado. Aunque es imposible reproducir de manera exacta una serie histórica con modelos de comportamiento del clima, su uso se considera pertinente para establecer órdenes de magnitud de la amenaza futura a nivel nacional.

#### 4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA AMENAZA POR HURACÁN PARA TODO EL PERÍODO ESTUDIADO

La comparación de los resultados obtenidos de amenaza por huracán en Guatemala, en términos de velocidad del viento máxima probable, se presenta para las 10 principales ciudades de Guatemala (Figura 58). En general es posible ver un incremento en la intensidad máxima probable para todas las ciudades. Este incremento es mayor en ciudades cercanas a la costa Caribe de Guatemala.

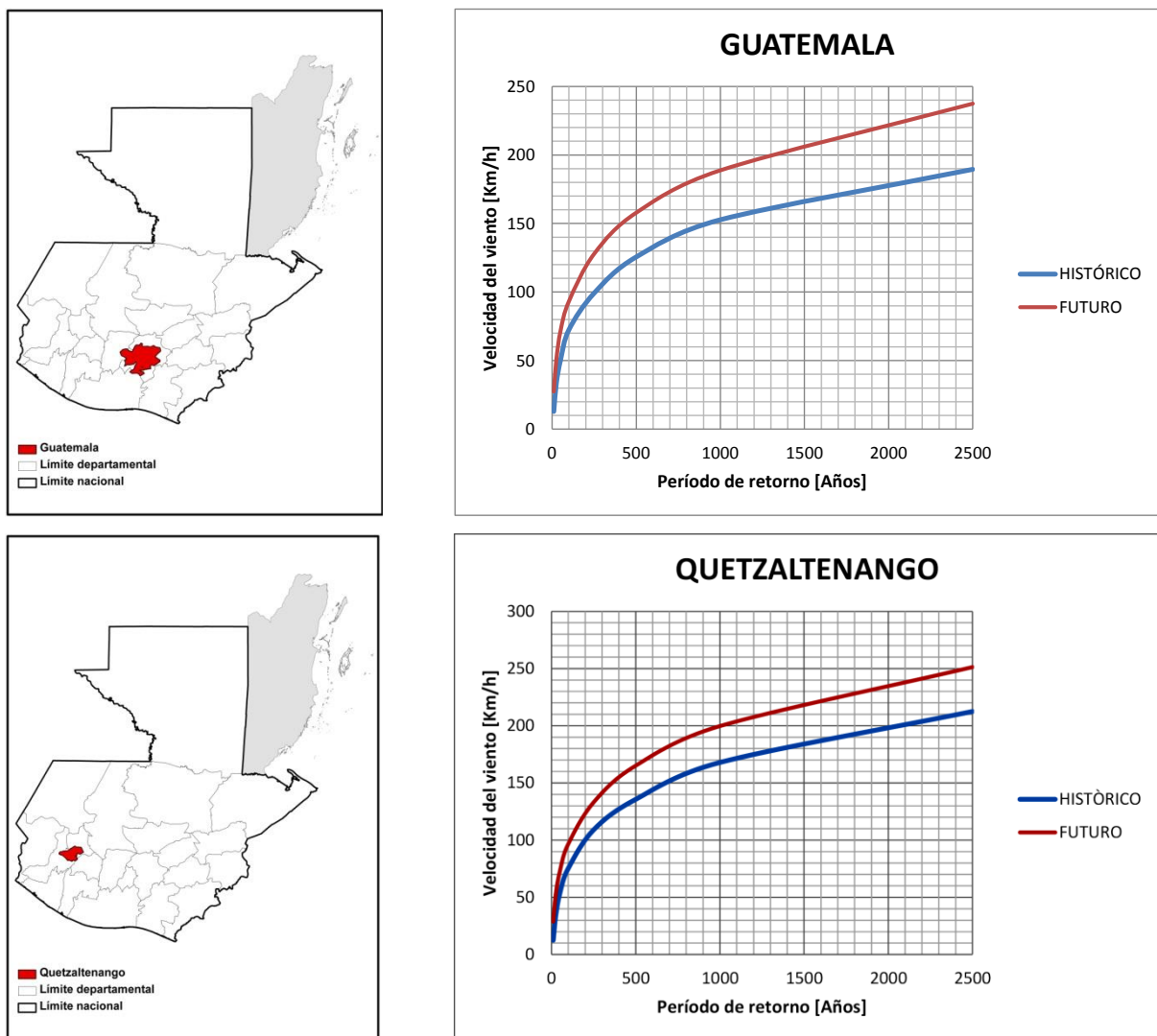
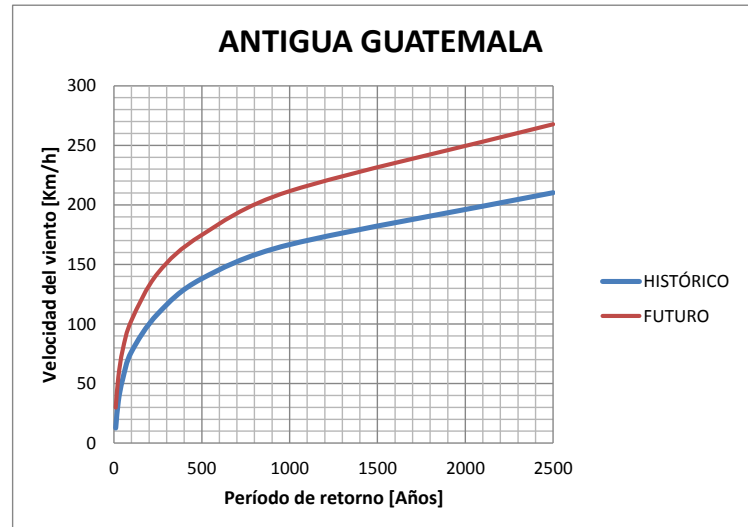
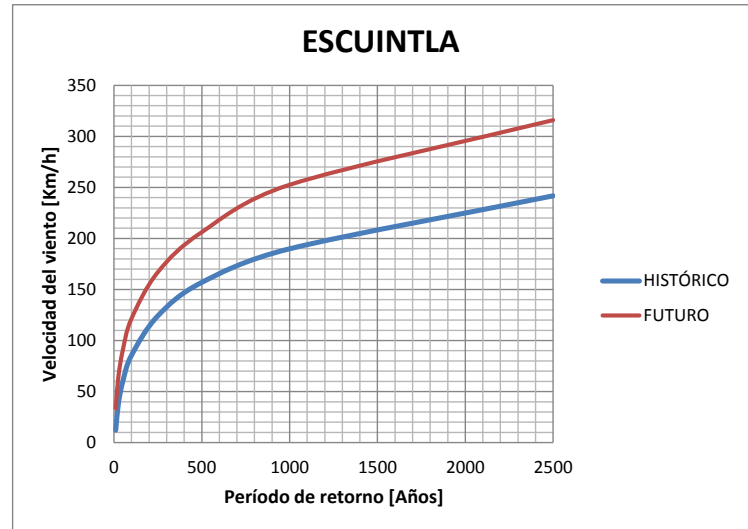


Figura 58

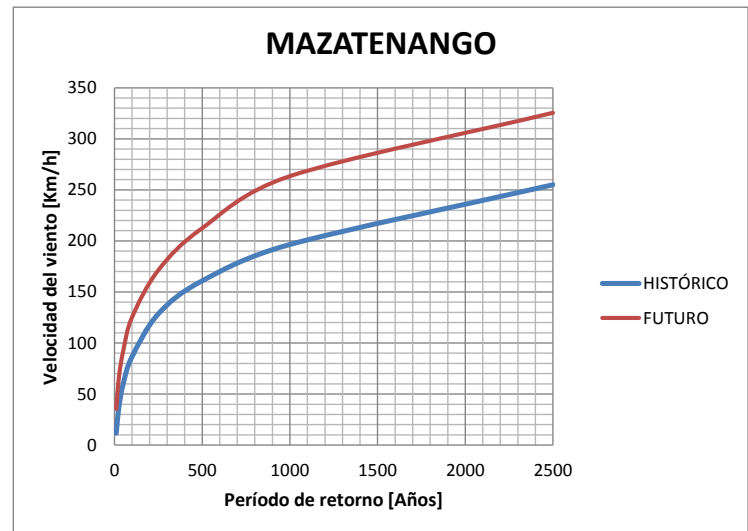
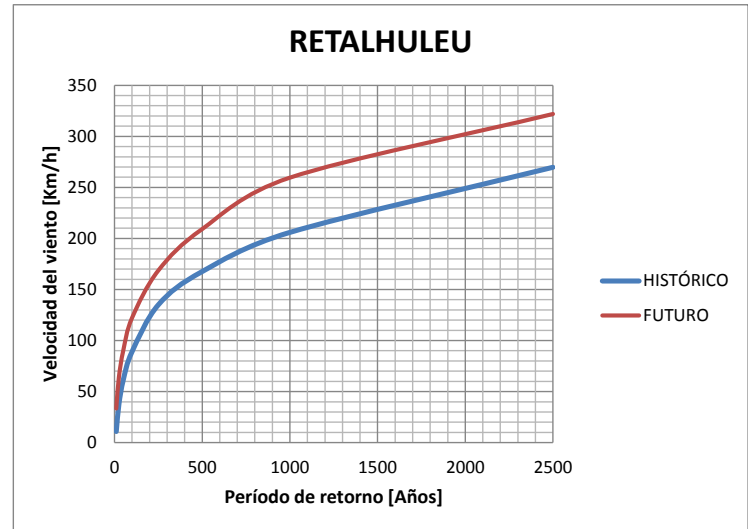
Curvas de amenaza por huracán para condiciones históricas vs condiciones futuras.



**Continuación Figura 59**

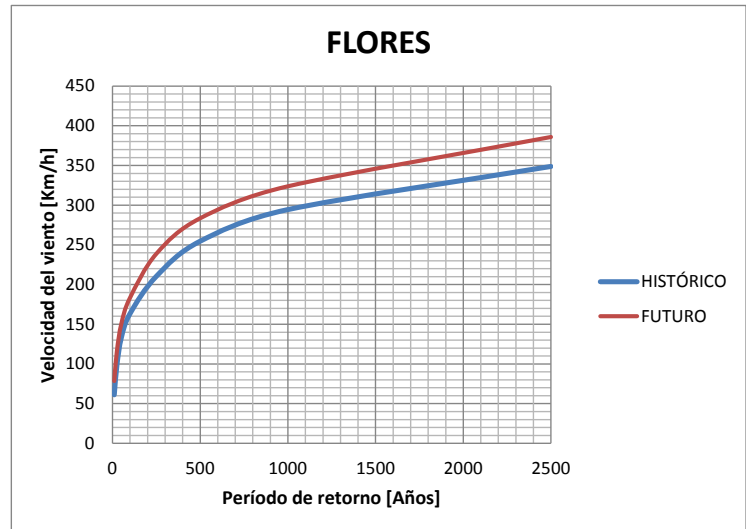
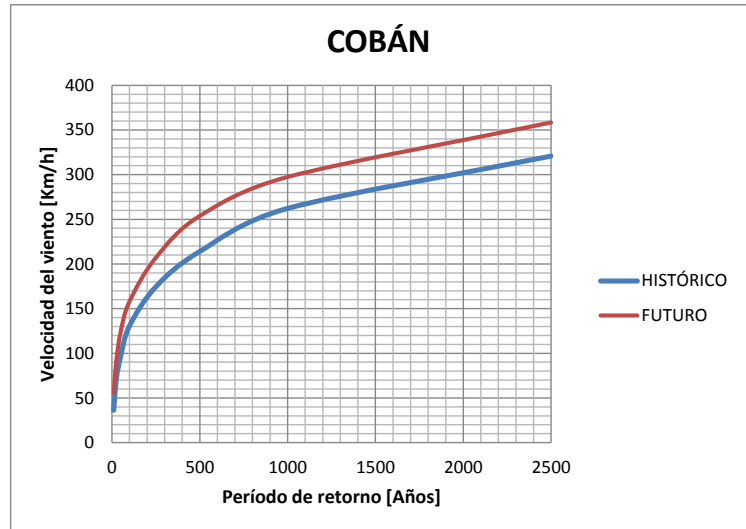
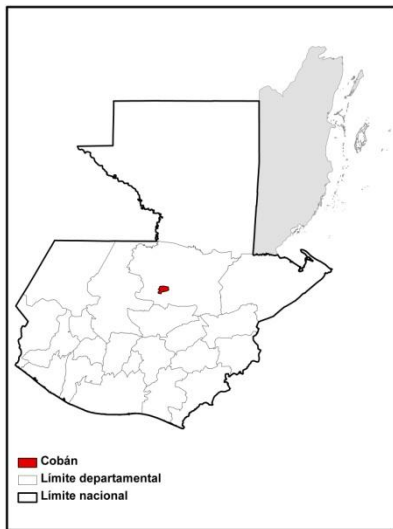
Curvas de amenaza por huracán para condiciones históricas vs condiciones futuras.





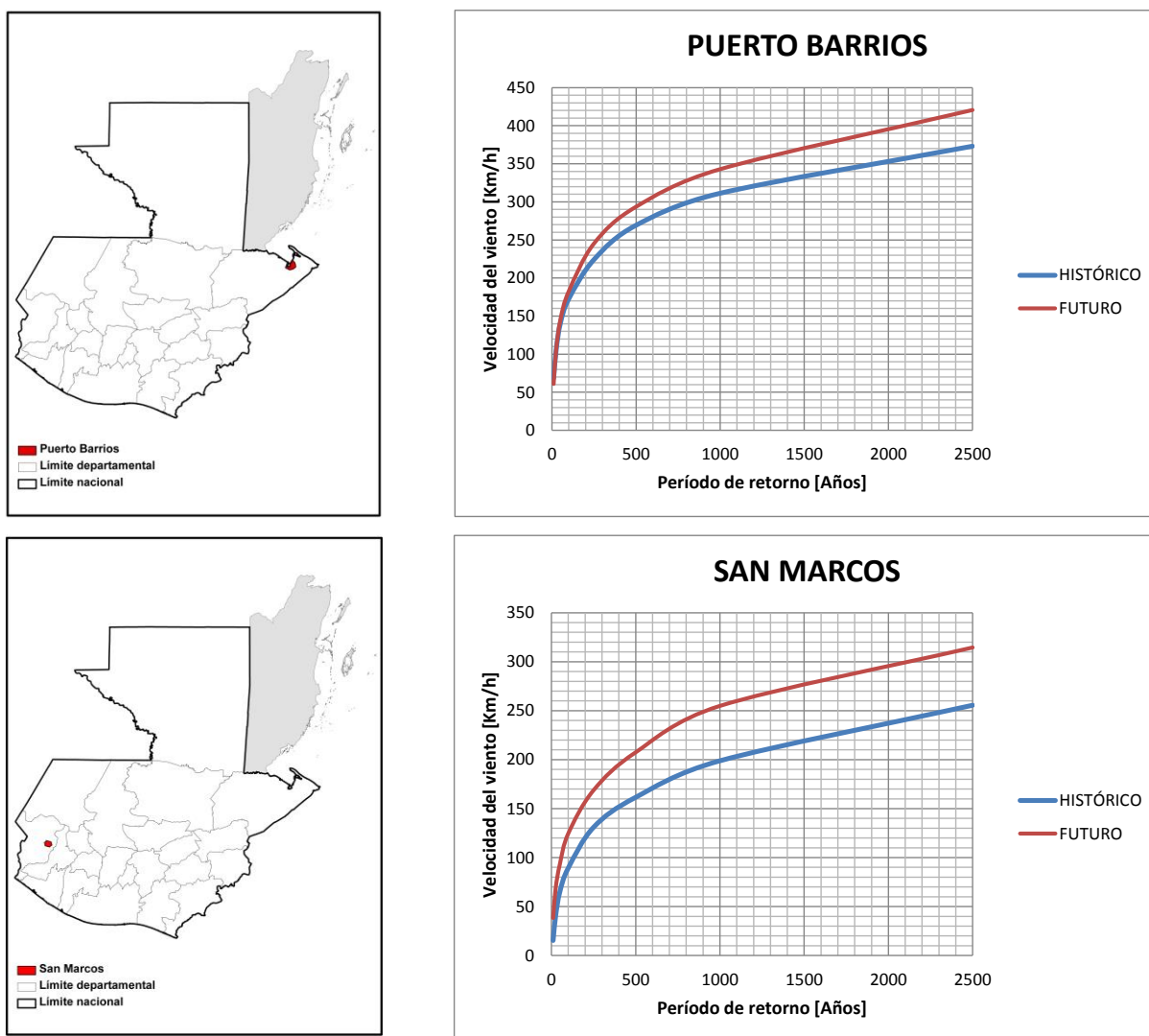
**Continuación Figura 59**

Curvas de amenaza por huracán para condiciones históricas vs condiciones futuras.



**Continuación Figura 59**

Curvas de amenaza por huracán para condiciones históricas vs condiciones futuras.



**Continuación Figura 59**

Curvas de amenaza por huracán para condiciones históricas vs condiciones futuras.

Es importante entender estos resultados a la luz de las tendencias esperadas con relación al incremento de la actividad ciclónica en Guatemala. El Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), en su informe especial SREX\_SPM, provee un marco de referencia general asociado a los efectos del cambio climático en términos de los cambios observados y proyectados en la actividad ciclónica en el mundo:

- “Cambios observados: teniendo en cuenta los cambios realizados en materia de capacidad de observación del pasado, existe un nivel de confianza bajo respecto de la observación de

cualquier aumento a largo plazo (es decir, 40 años o más) de la actividad de los ciclones tropicales.”

- “Cambios proyectados: probable que la frecuencia mundial de ciclones tropicales disminuirá o permanecerá fundamentalmente sin cambios. Probable aumento de la velocidad máxima media del viento de los ciclones tropicales, aunque puede que el aumento no se produzca en todas las cuencas oceánicas. Es probable que aumenten las precipitaciones intensas relacionadas con ciclones tropicales. Se espera que el aumento del nivel del mar siga intensificando los efectos de los ciclones tropicales.”

En este sentido, es de esperarse un aumento en los efectos de los ciclones (velocidad del viento) en el territorio de Guatemala por cuenta del incremento en intensidad (categoría Saffir-Simpson) de los ciclones del Caribe. Adicionalmente se espera un aumento importante en las precipitaciones asociadas al paso de ciclones tropicales.

## **5. PROXI DE EXPOSICIÓN A NIVEL NACIONAL**

El modelo de exposición a nivel nacional está basado en información estadística y censos de la población; su resolución es de nivel regional según las entidades territoriales en las cuales se subdivide el país. Incluye tanto construcciones urbanas, infraestructura urbana e infraestructura a nivel nacional.

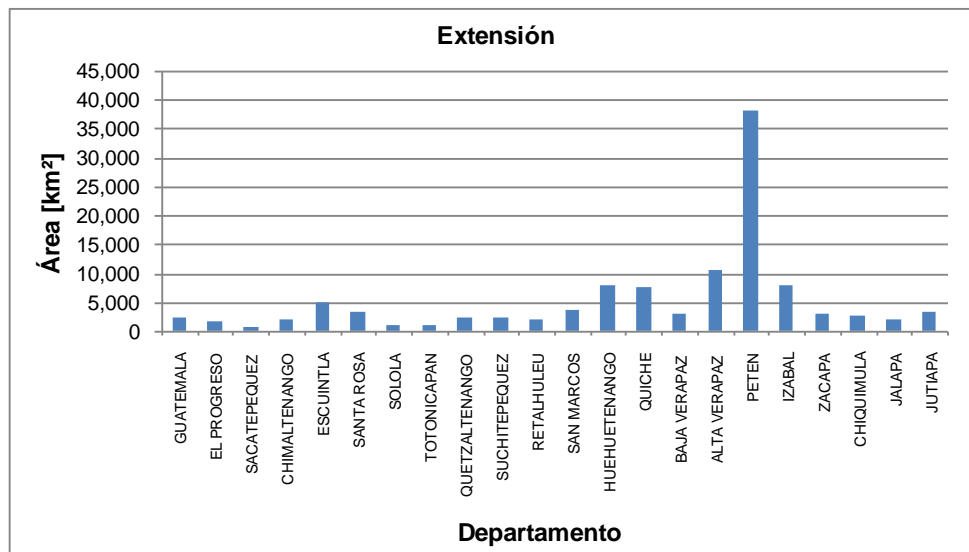
Este modelo de exposición fue desarrollado por el grupo consultor para la evaluación del riesgo catastrófico de Guatemala (ERN-AL, 2010). En esta sección se presentan los principales resultados del Proxi. Como Anexo 2 a este informe se entrega la totalidad de la información contenida en el Proxi.

### **5.1 Resumen general de indicaciones de exposición**

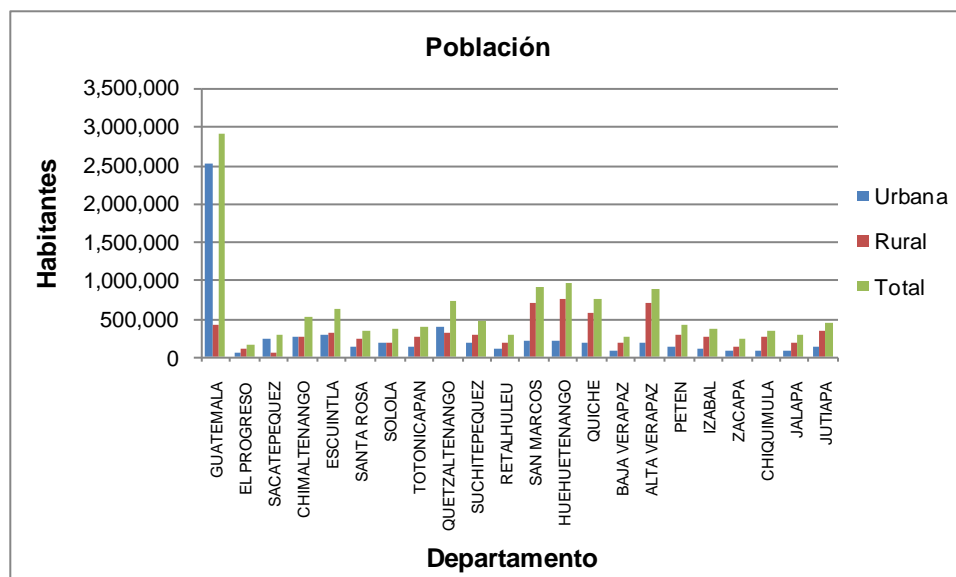
Para comprender la distribución relativa de valores expuestos tanto geográficamente como por sectores económicos, del desarrollo o de uso se presentan a continuación una serie de gráficas representativas de los parámetros más importantes del modelo.

#### *5.1.1 Edificaciones urbanas según área construida y valor por departamentos y grupos de uso*

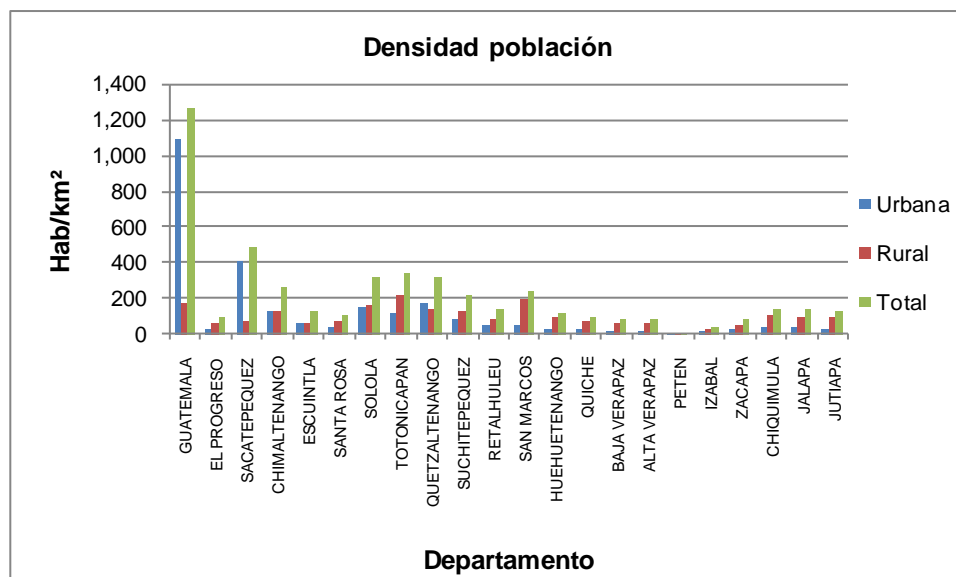
De la Figura 59 a la Figura 61 se presentan la extensión en km<sup>2</sup>, la población y la densidad poblacional (urbana, rural y total) para cada uno de los 22 departamentos de Guatemala.



**Figura 59**  
Extensión territorial



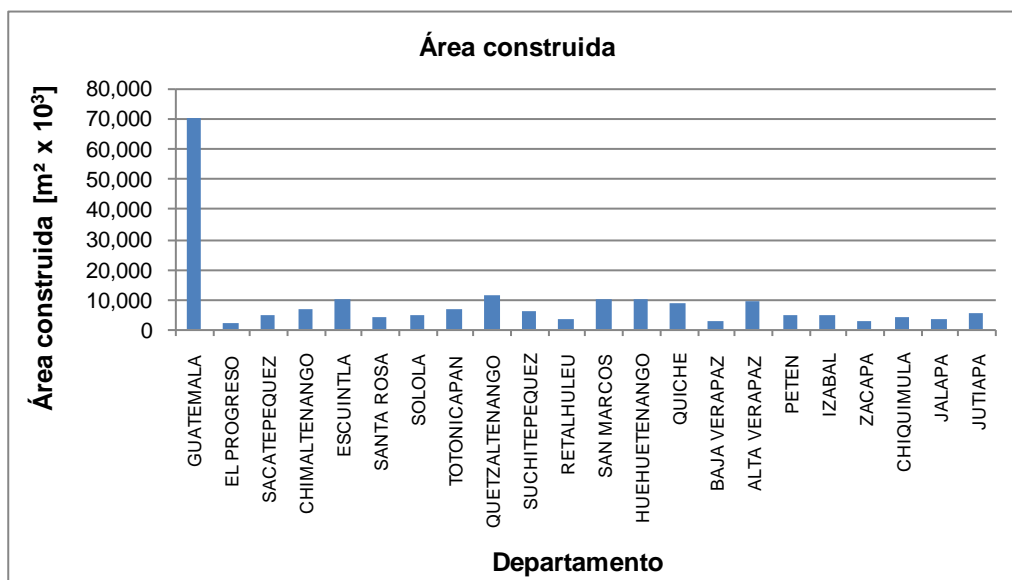
**Figura 60**  
Población por departamento



**Figura 61**

Densidad de población por departamento

La Figura 62 y la Figura 63 presentan los valores estimados de área de construcción urbana en m<sup>2</sup> y valor expuesto correspondiente para cada uno de los departamentos.



**Figura 62**

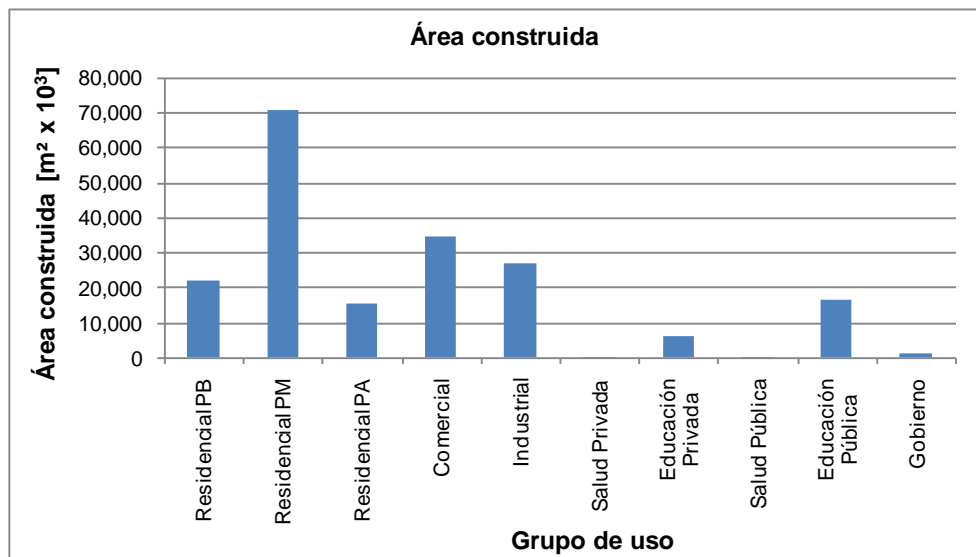
Área construida por departamento



**Figura 63**

Valores expuestos de edificaciones regulares por departamento

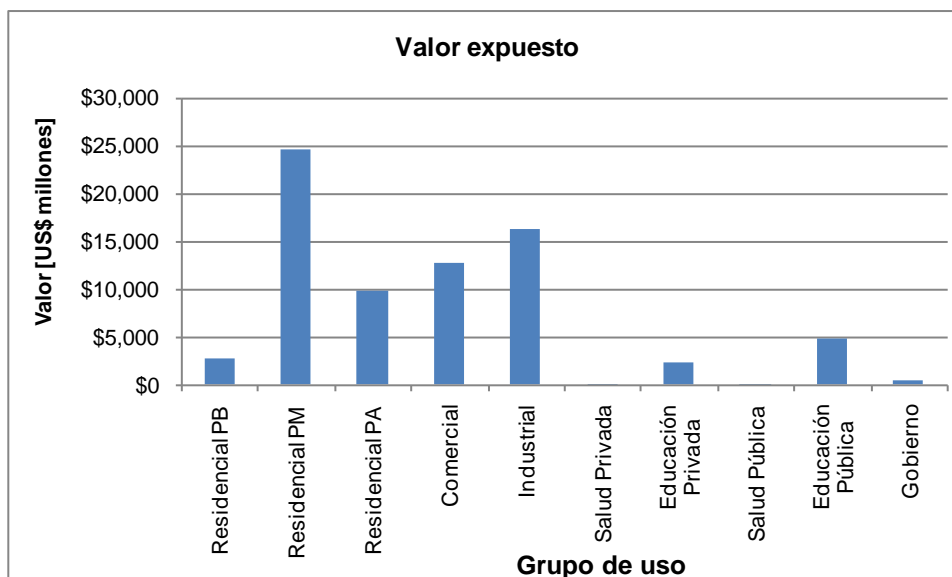
Por otro lado la Figura 64 y la Figura 65 presentan la información correspondiente al área construida aproximada y valores de exposición para cada uno de los grupos de uso.



**Figura 64**

Área construida por grupo de uso

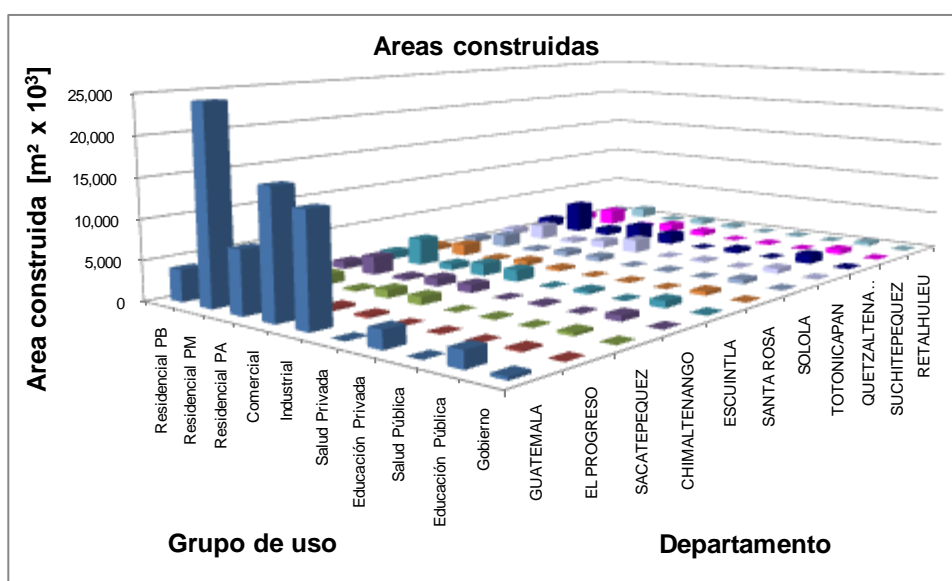




**Figura 65**

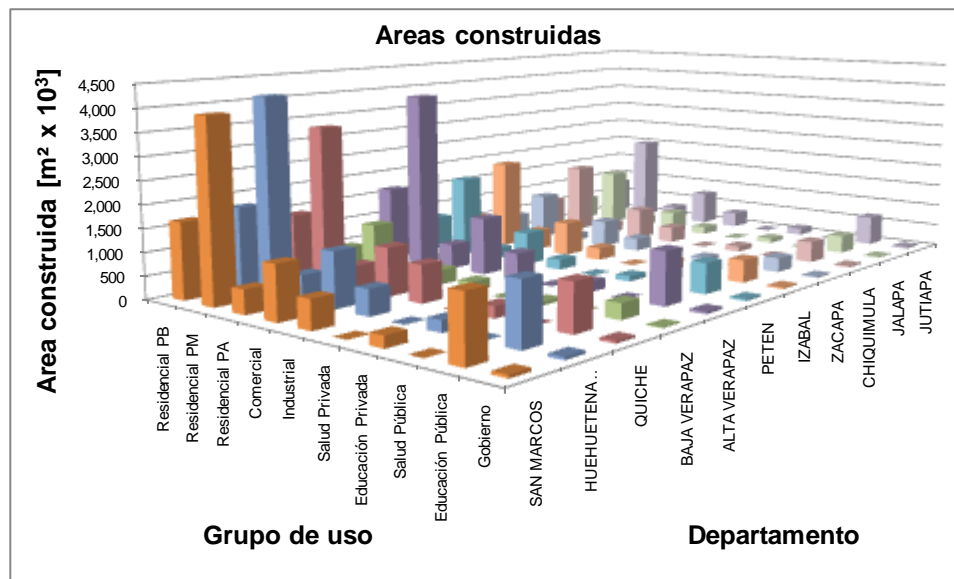
Valor expuesto por grupo de uso

La información anterior se combina en gráficas de tres ejes (Figura 66 y Figura 67) en las cuales se presentan las áreas de construcción y los valores expuestos correspondientes estimados y discriminados de acuerdo con cada uno de los departamentos y con cada uno de los grupos de uso.

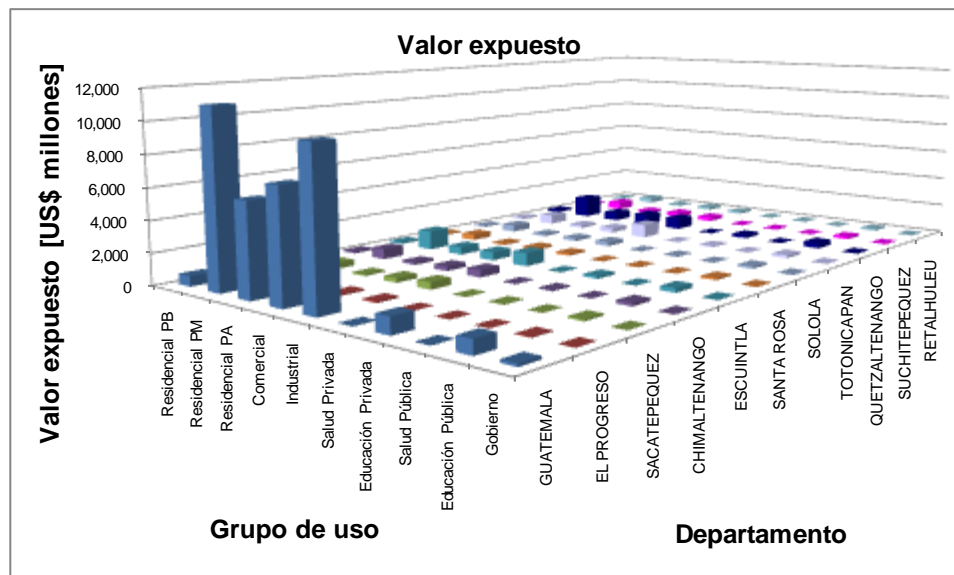


**Figura 66**

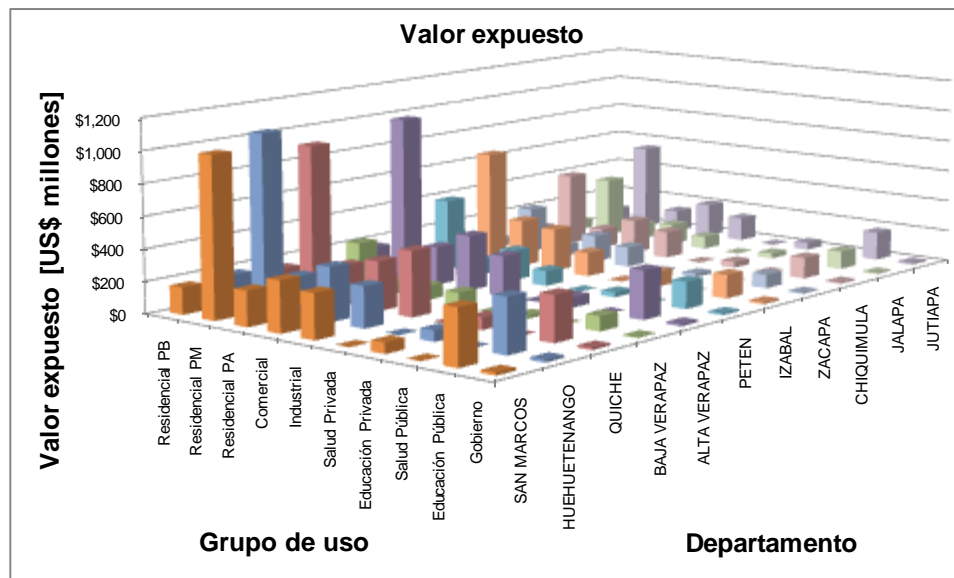
Área construida por departamento y grupo de uso



**Continuación Figura 59**  
 Área construida por departamento y grupo de uso



**Figura 67**  
 Valor expuesto por departamento y grupo de uso

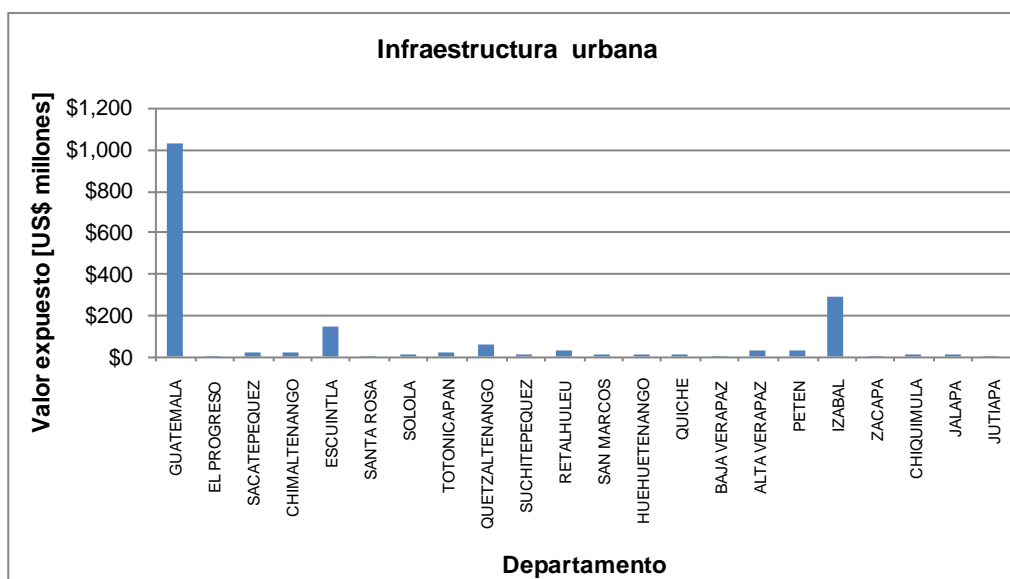


**Continuación Figura 60**

Valor expuesto por departamento y grupo de uso

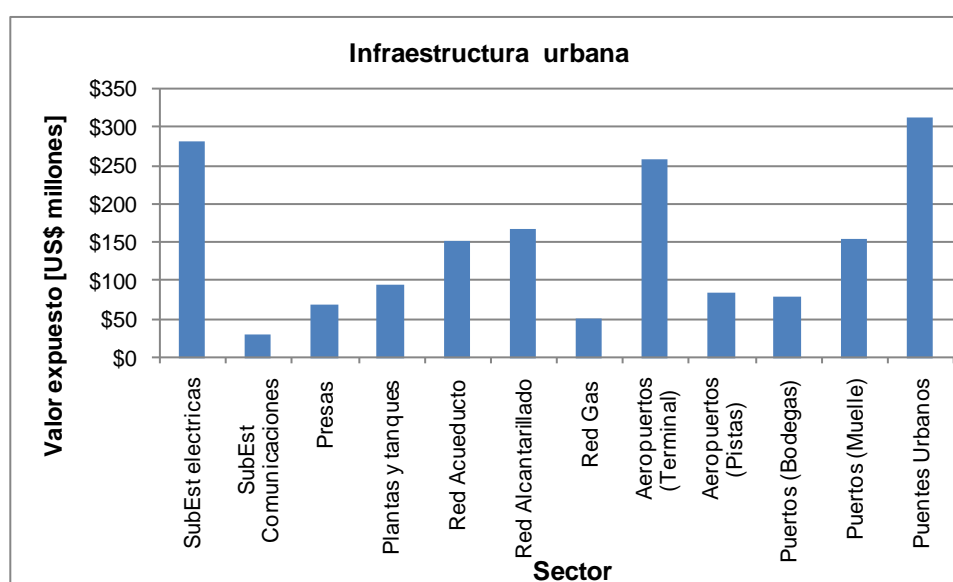
### 5.1.2 Infraestructura urbana según valores por departamentos y sectores

La Figura 68 y la Figura 69 presentan los valores expuestos estimados de la infraestructura urbana que incluye puentes, aeropuertos, puertos, sistema de distribución de energía, telecomunicaciones, sistemas de potabilización, distribución y tratamiento de aguas y sistema de distribución de gas. La información se presenta discriminada para cada uno de los departamentos y por sectores.



**Figura 68**

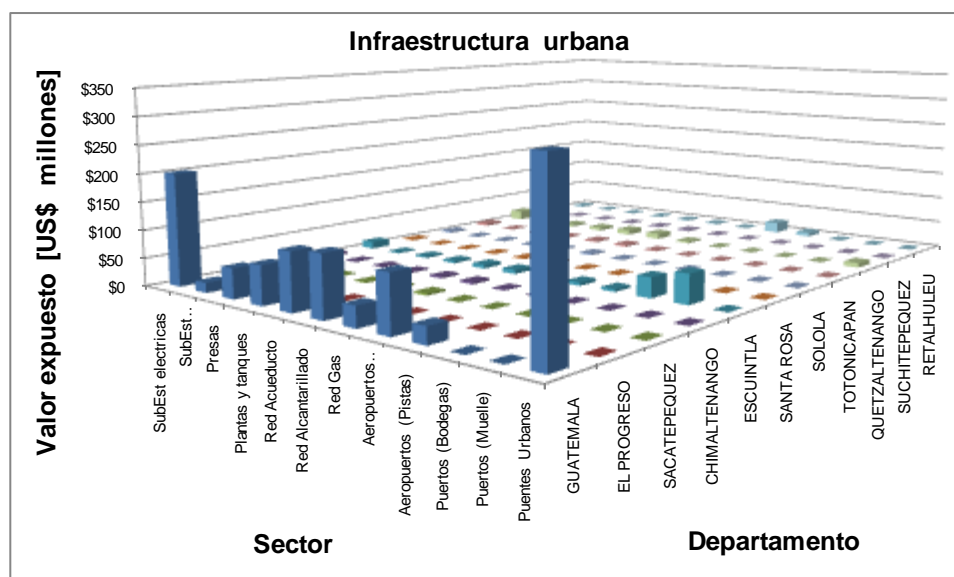
Valor expuesto en infraestructura urbana por departamentos



**Figura 69**

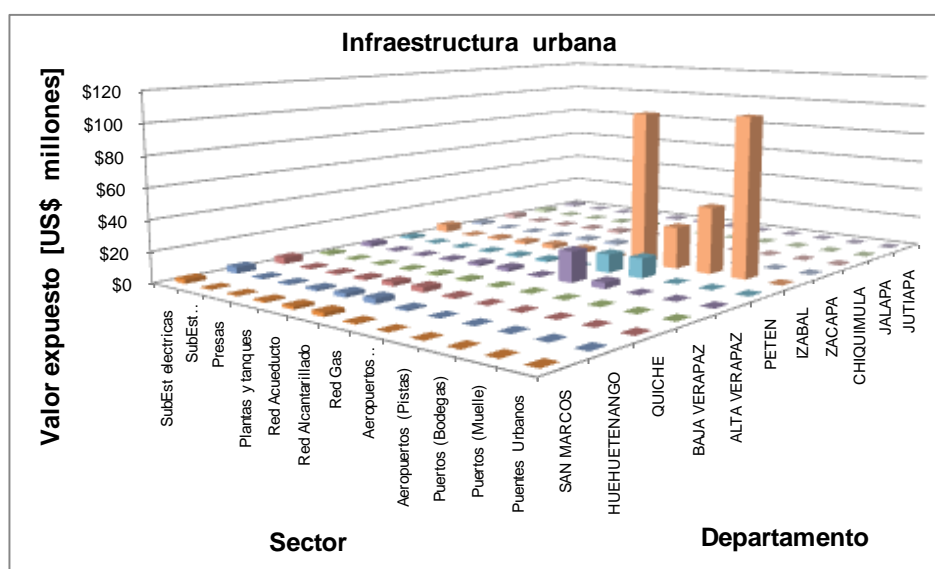
Valor expuesto en infraestructura urbana por sector

La Figura 70 muestra la información presentada anteriormente en una gráfica de tres dimensiones.



**Figura 70**

Valor expuesto en infraestructura urbana por departamento y sector

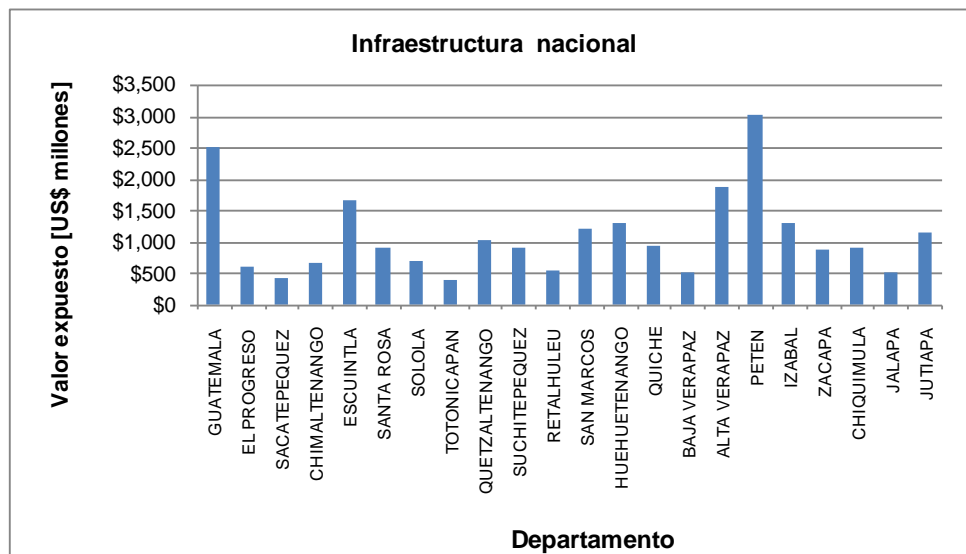


**Continuación Figura 63**

Valor expuesto en infraestructura urbana por departamento y sector

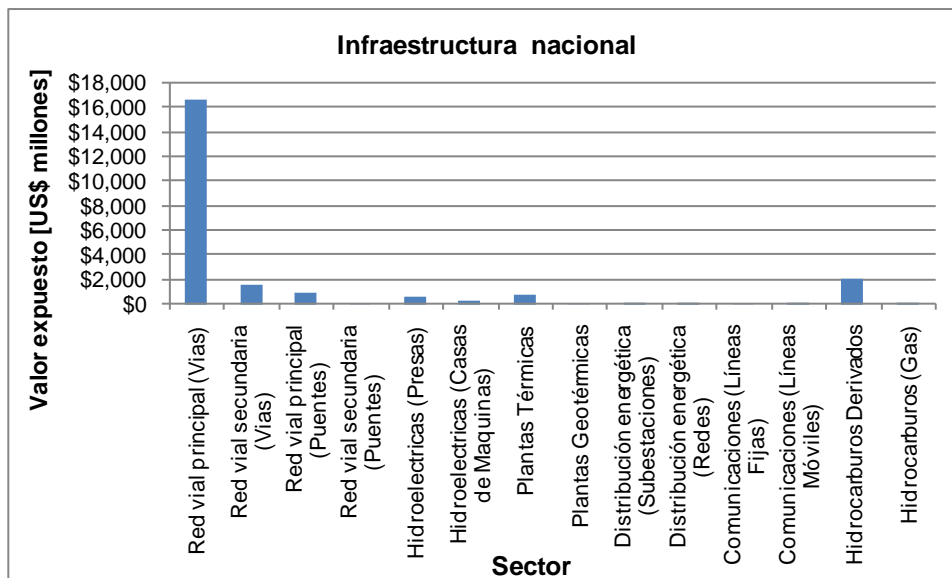
### 5.1.3 Infraestructura nacional según valores por departamentos y sectores

La Figura 71 y Figura 72 presentan los valores expuestos estimados de la infraestructura nacional que incluye la red vial principal y secundaria, puentes vehiculares, sistemas de generación de energía, presas, plantas térmicas, subestaciones de energía, subestaciones de telecomunicaciones, subestaciones y redes de distribución de gas natural y sistema de hidrocarburos. La información se presenta discriminada para cada uno de los departamentos y por sectores.



**Figura 71**

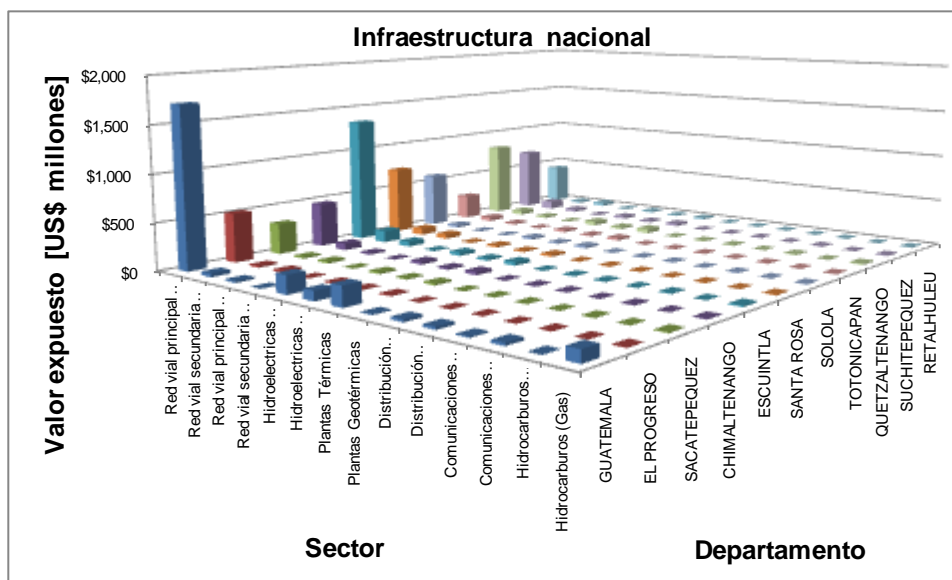
Valor expuesto en infraestructura nacional por departamento



**Figura 72**

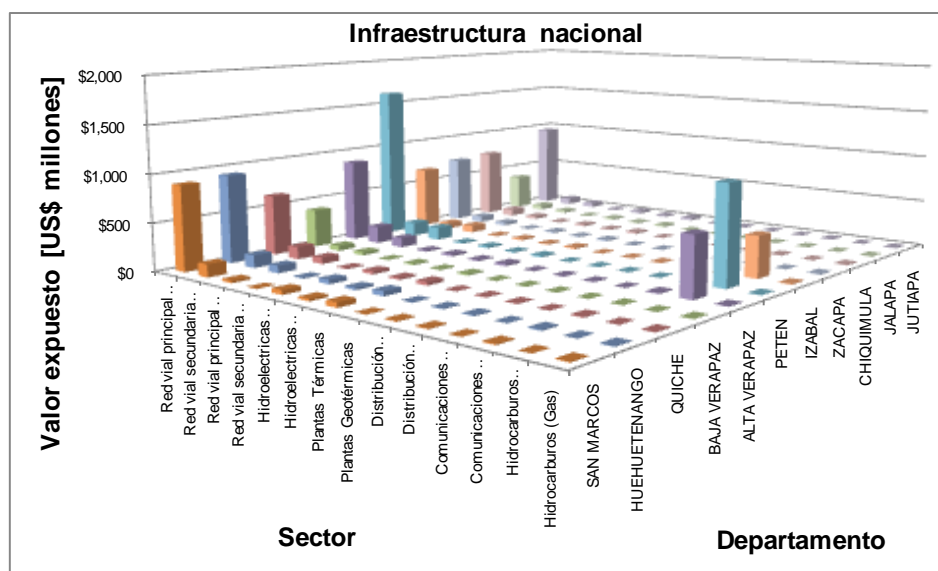
Valor expuesto en infraestructura nacional por sector

La Figura 73 resume la información anterior en una gráfica de tres ejes.



**Figura 73**

Valor expuesto en infraestructura nacional por departamento y sector



**Continuación Figura 66**

Valor expuesto en infraestructura nacional por departamento y sector

#### 5.1.4 Resumen de valores expuestos totales por departamentos y sectores

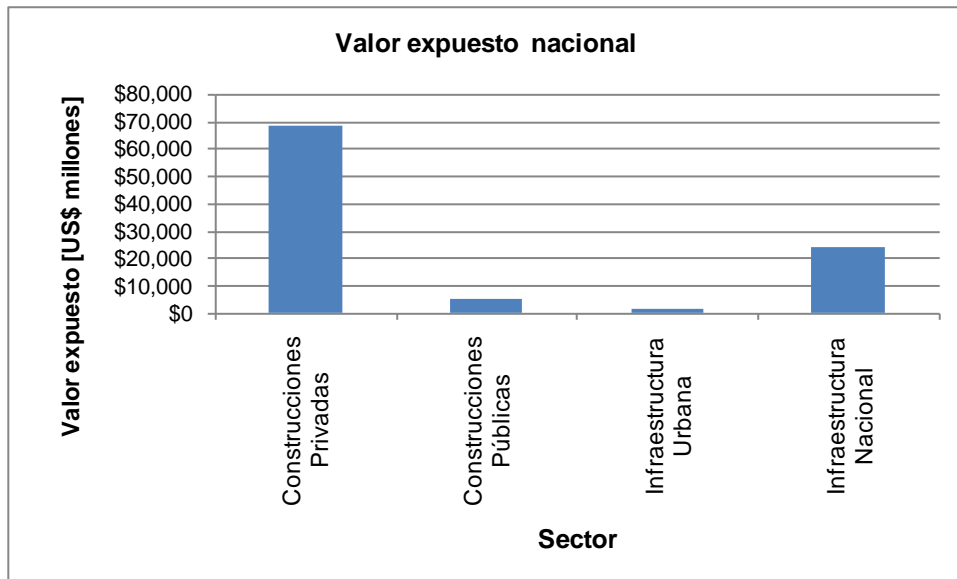
La Figura 74 y la Figura 75 presentan el resumen de los valores totales expuestos que resultan de sumar los valores de las edificaciones urbanas, la infraestructura urbana y la infraestructura nacional discriminados para cada uno de los departamentos y para cada uno de los sectores de uso. En las categorías de sectores se incluye en forma individual los sectores asociados a las edificaciones urbanas, la infraestructura urbana y la infraestructura nacional.





**Figura 74**

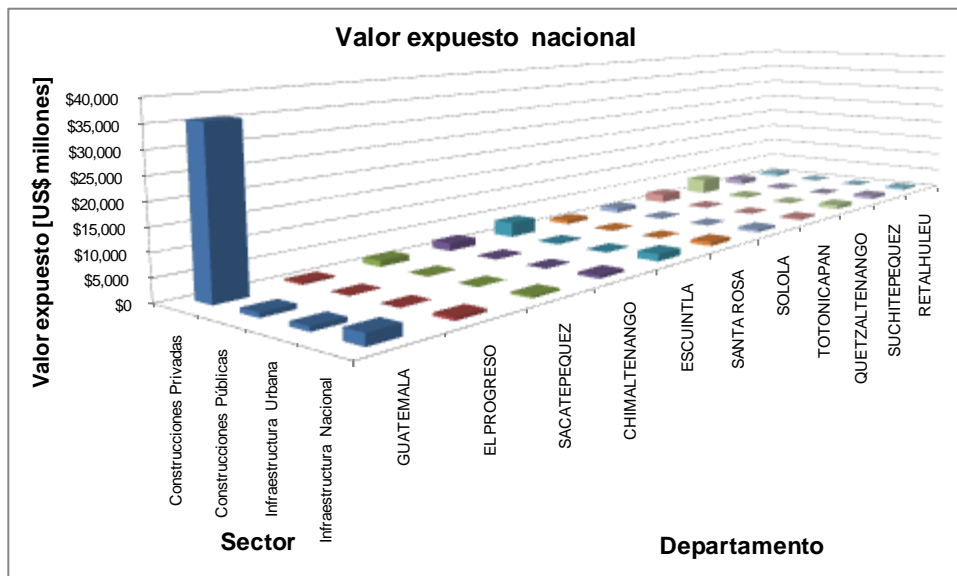
Valor total expuesto nacional por departamento



**Figura 75**

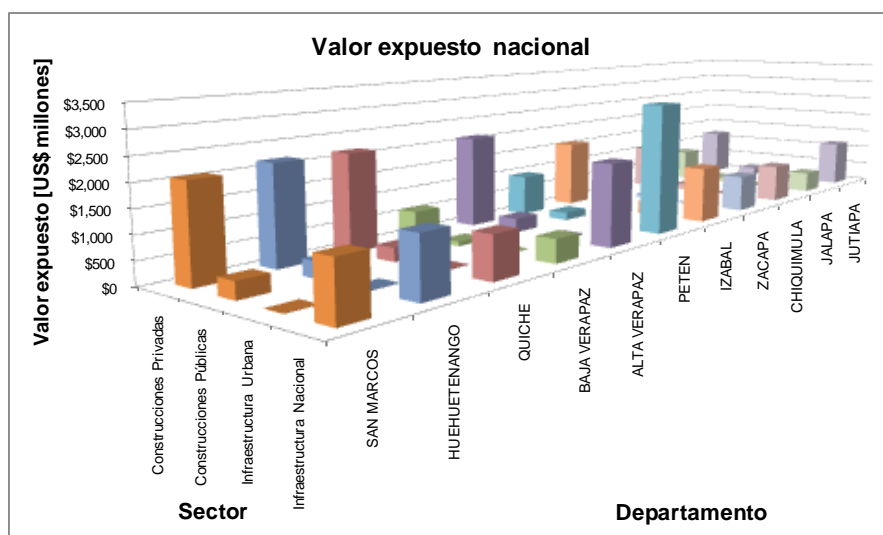
Valor total expuesto nacional por sectores

La Figura 76 muestra la información presentada anteriormente en una gráfica de tres dimensiones.



**Figura 76**

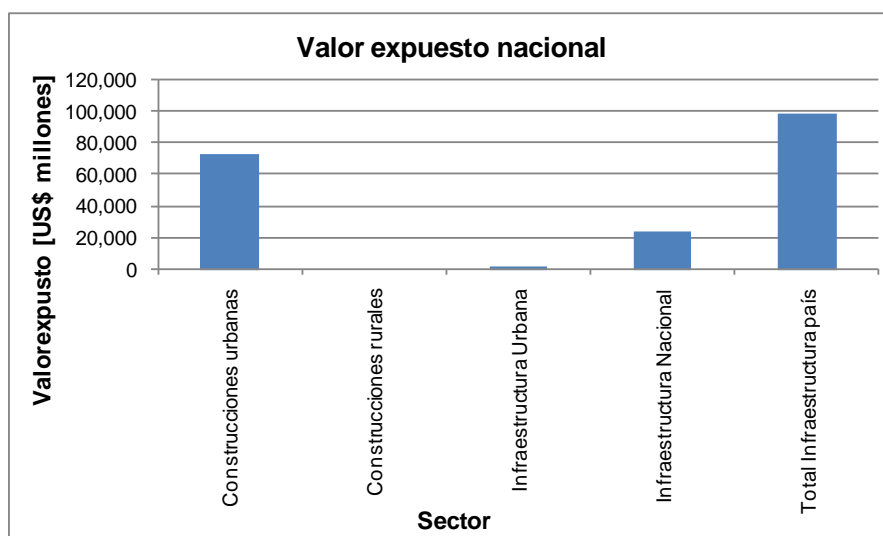
Valor total expuesto en infraestructura nacional por departamentos y sectores



**Continuación Figura 69**

Valor total expuesto en infraestructura nacional por departamentos y sectores

La Figura 77 muestra los valores expuestos nacionales para los sectores de construcciones urbanas y rurales e infraestructura urbana y nacional, adicionalmente muestra el valor total expuesto del país.

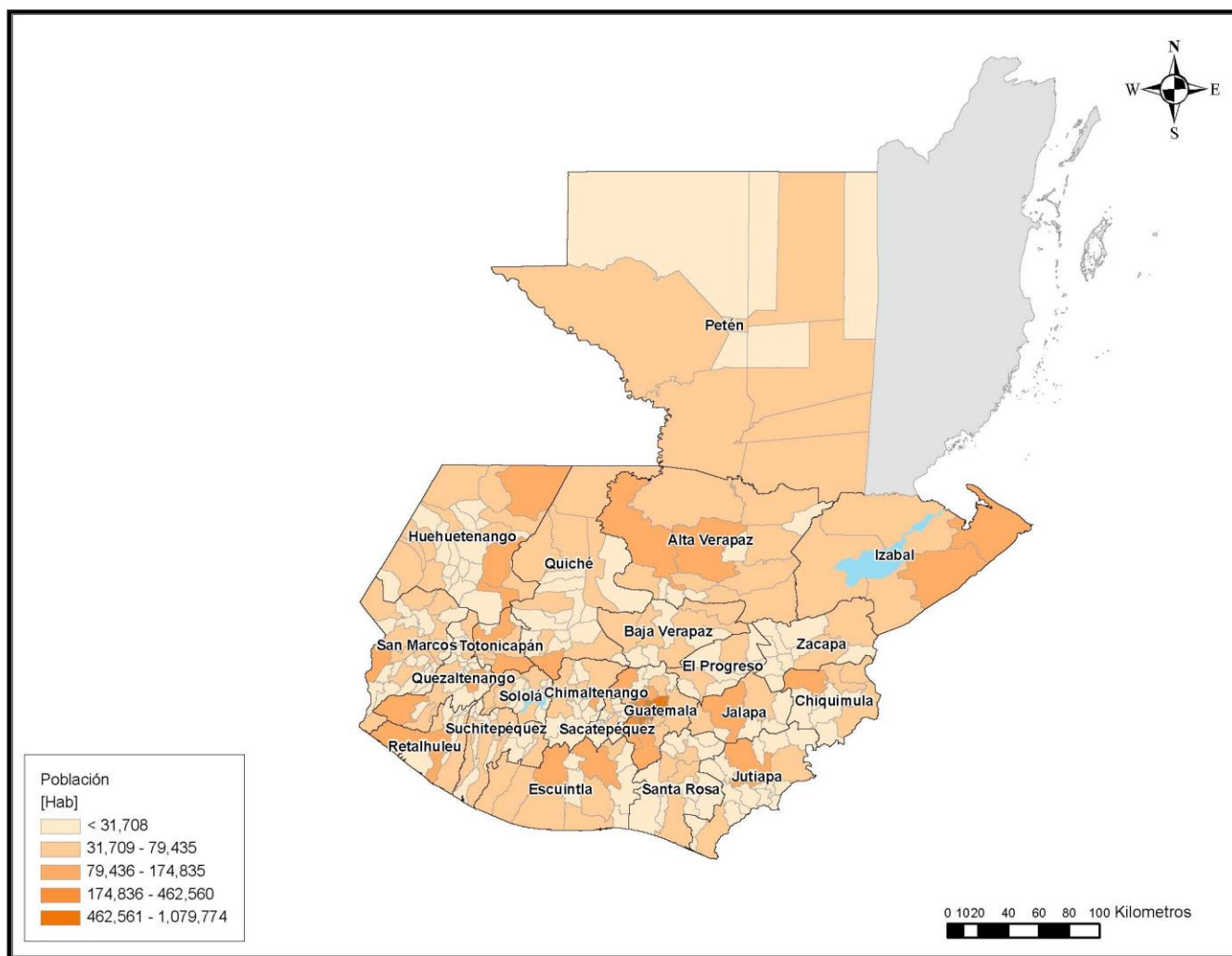


**Figura 77**

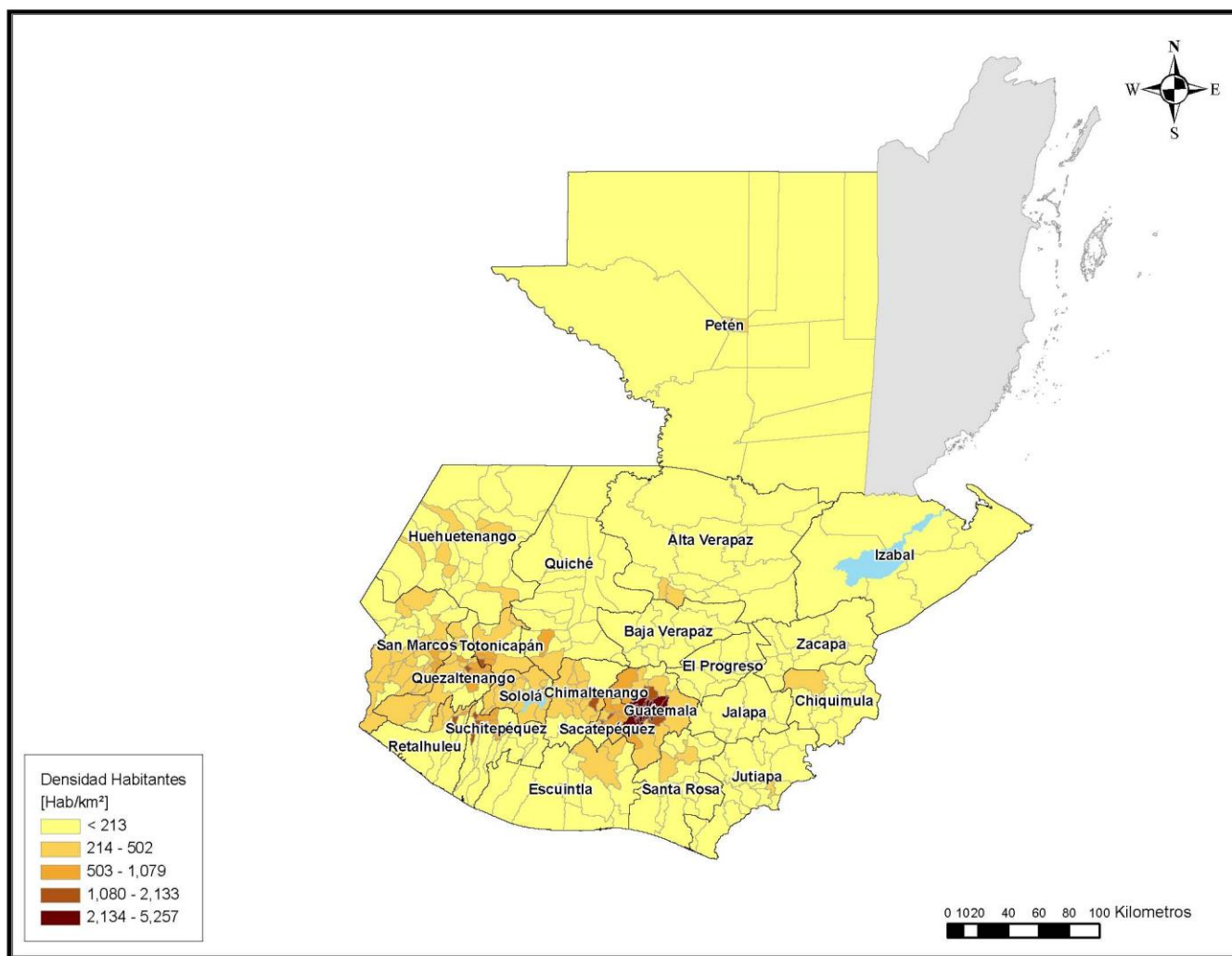
Valor expuesto nacional por sector

### 5.1.5 *Mapas descriptivos*

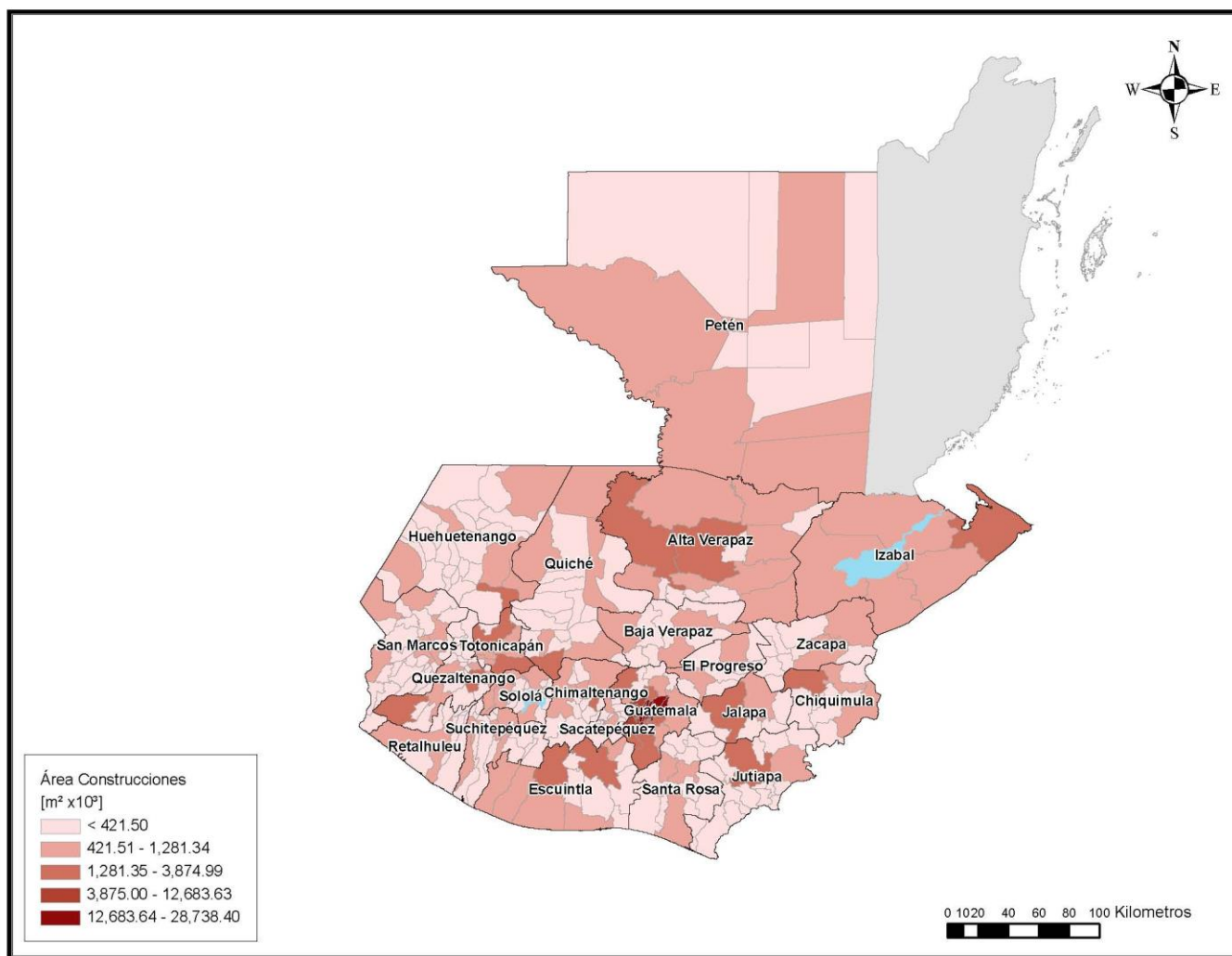
De la Figura 78 a la Figura 87 se presentan mapas de información por municipios y departamentos, para cada una de las siguientes variables: población, distribución de área construida y distribución del valor de exposición.



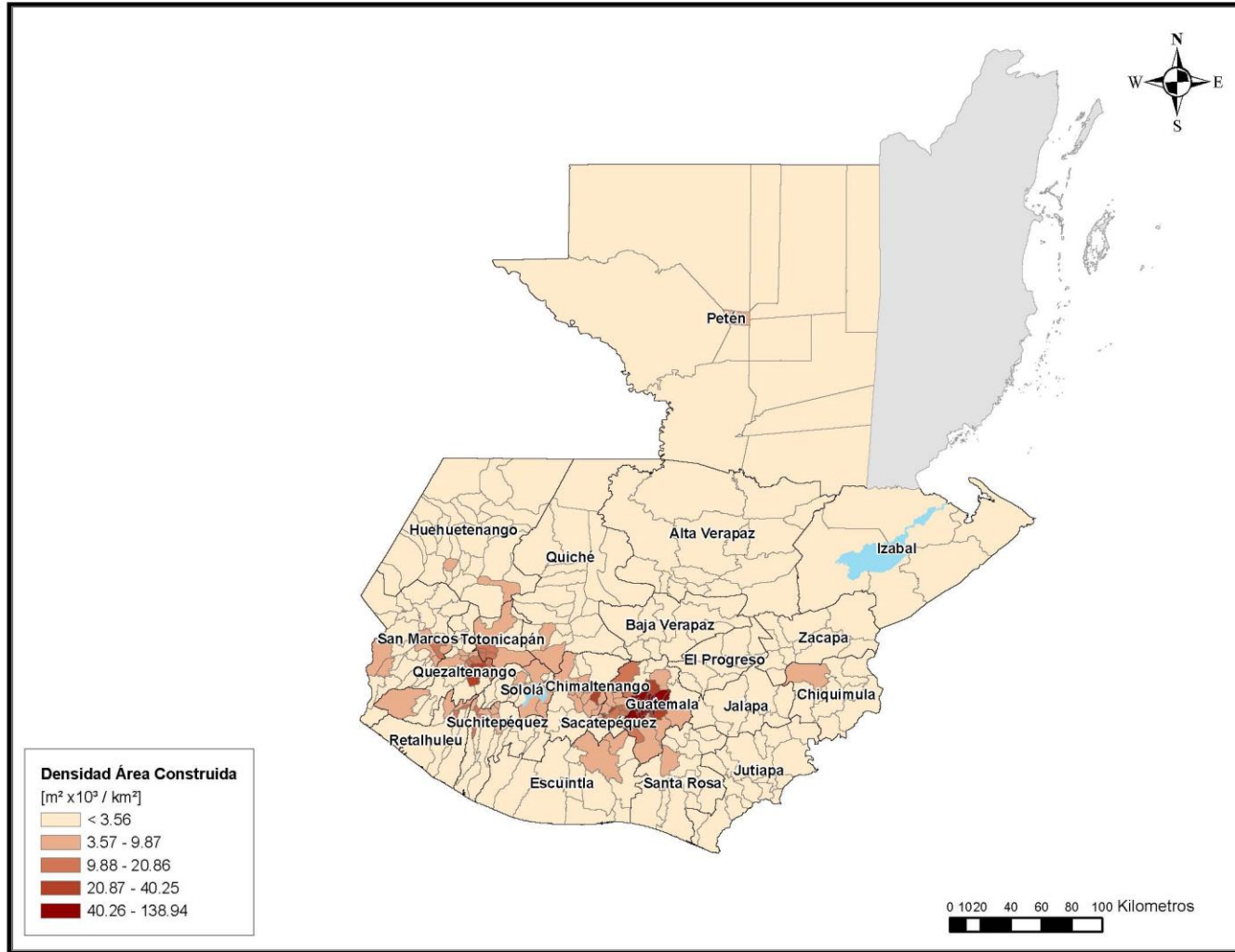
**Figura 78**  
Población por municipio



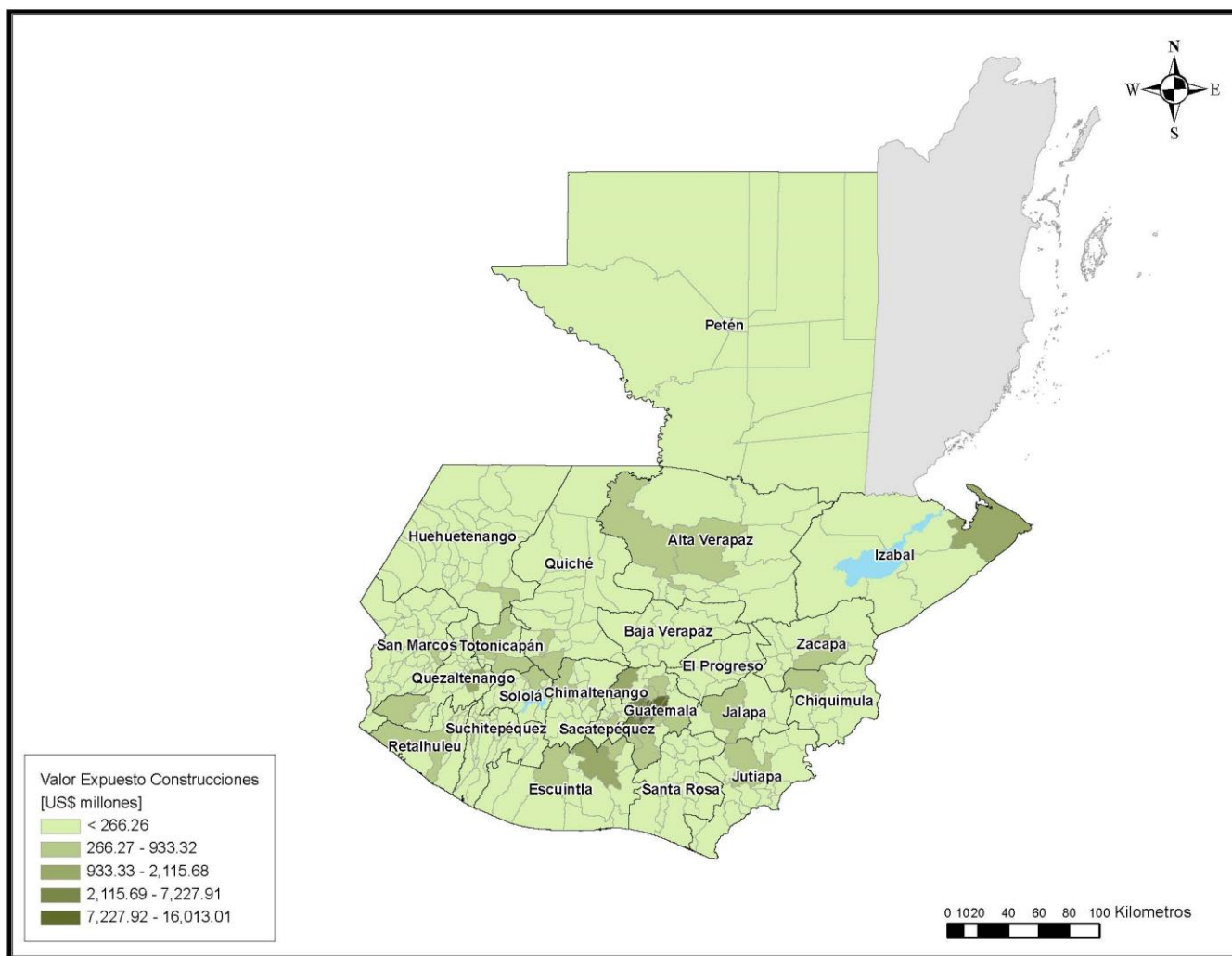
**Figura 79**  
Densidad poblacional por municipio



**Figura 80**  
Área construida por municipio

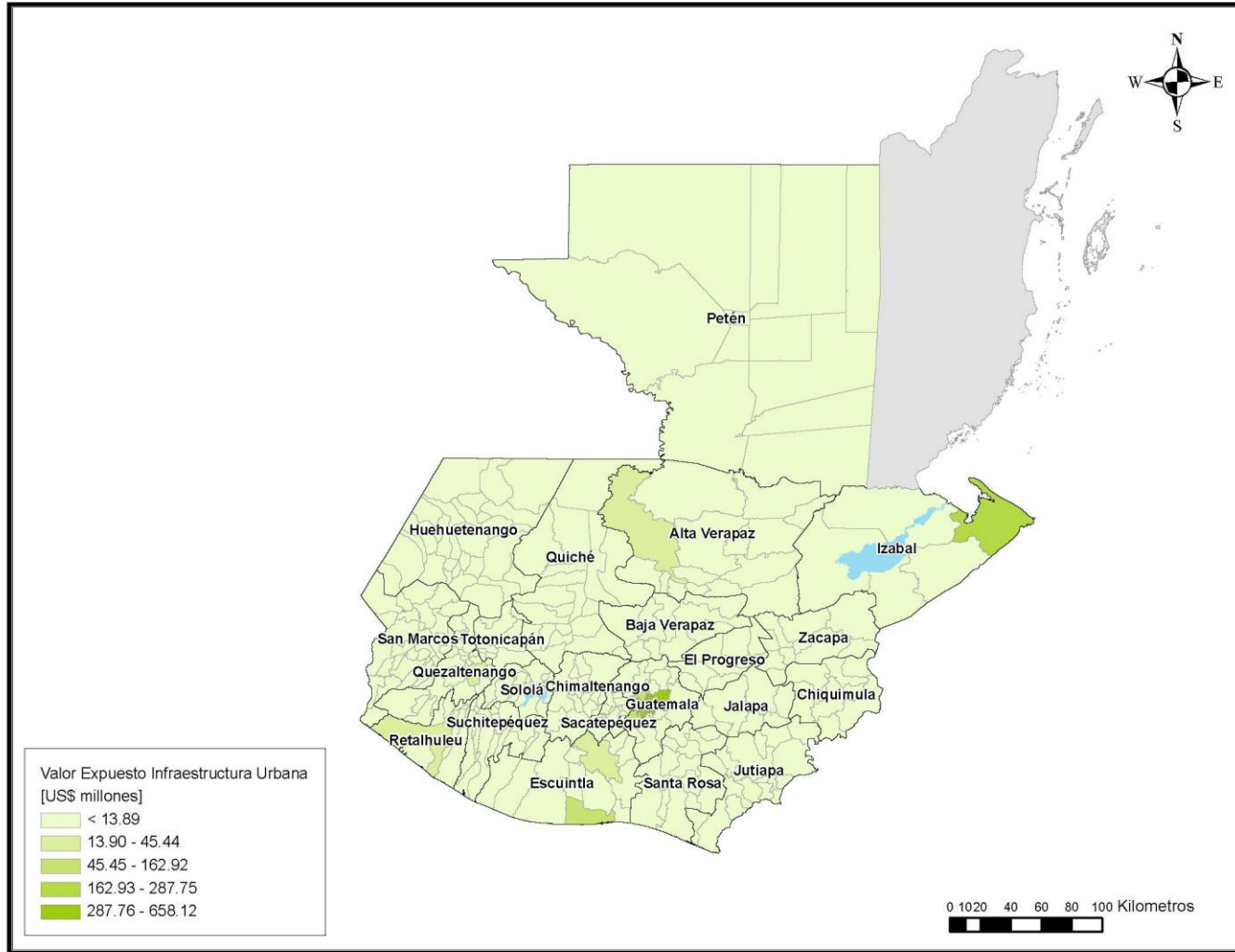


**Figura 81**  
Densidad de área construida por municipio

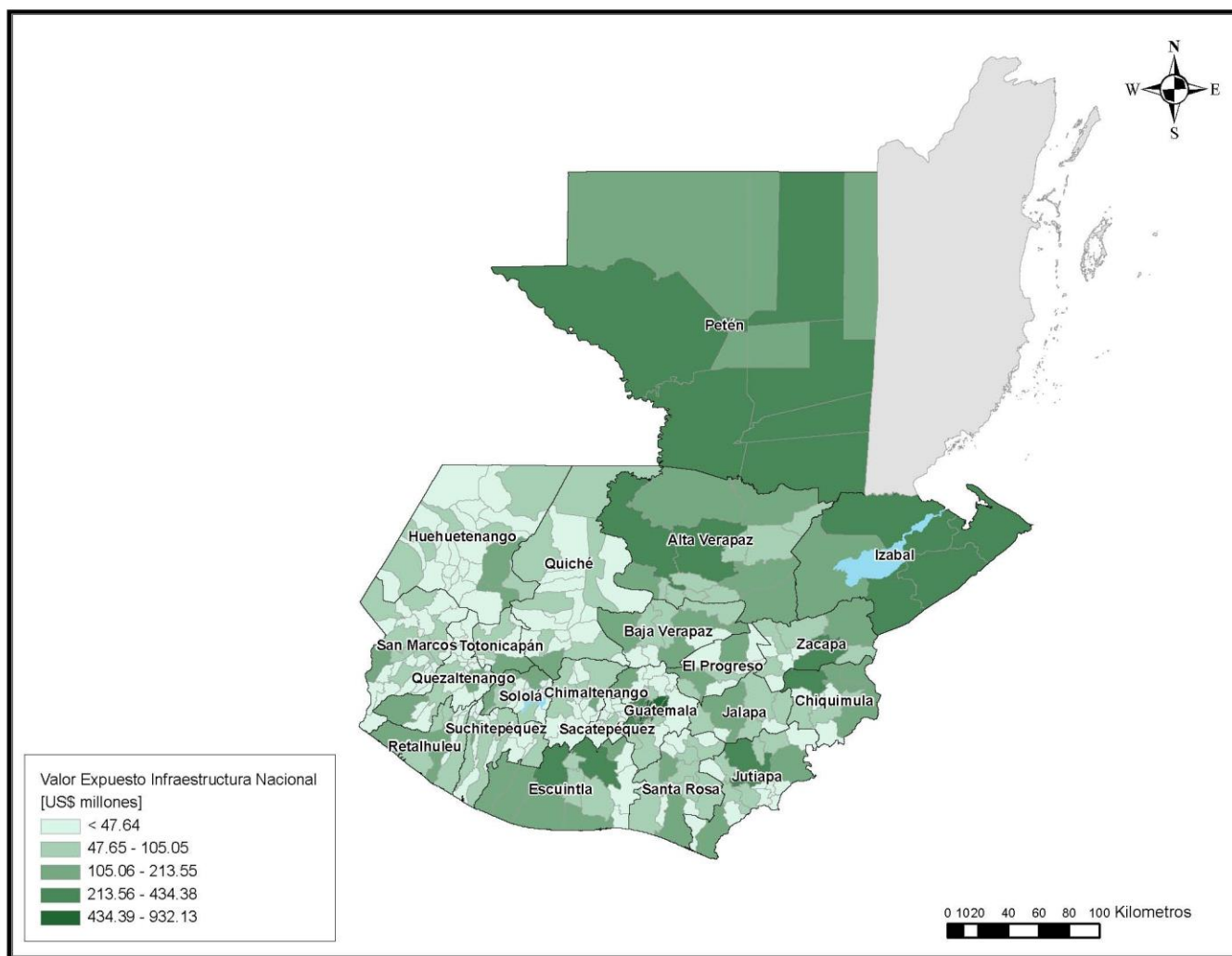


**Figura 82**  
Valores expuestos de construcciones por municipio

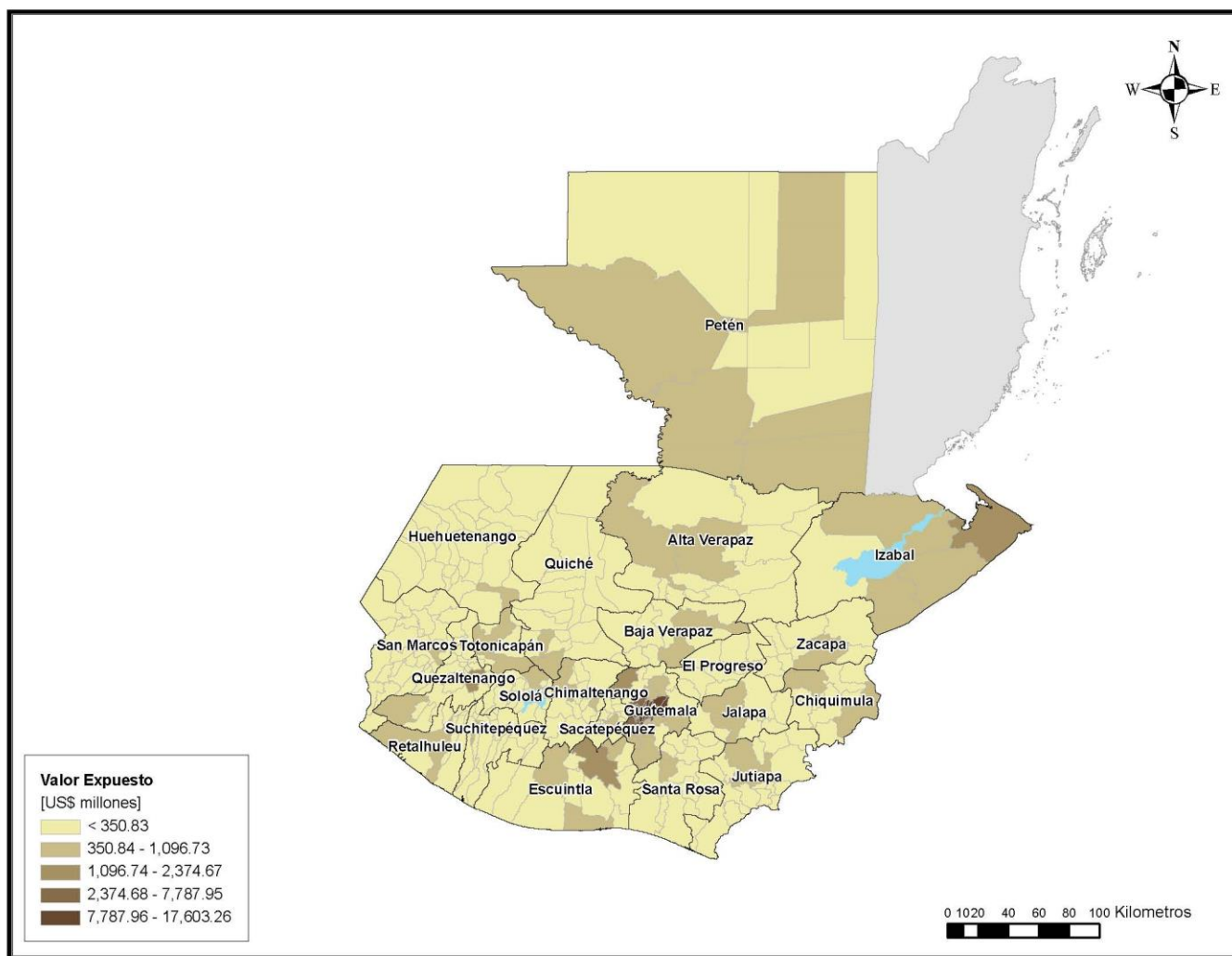




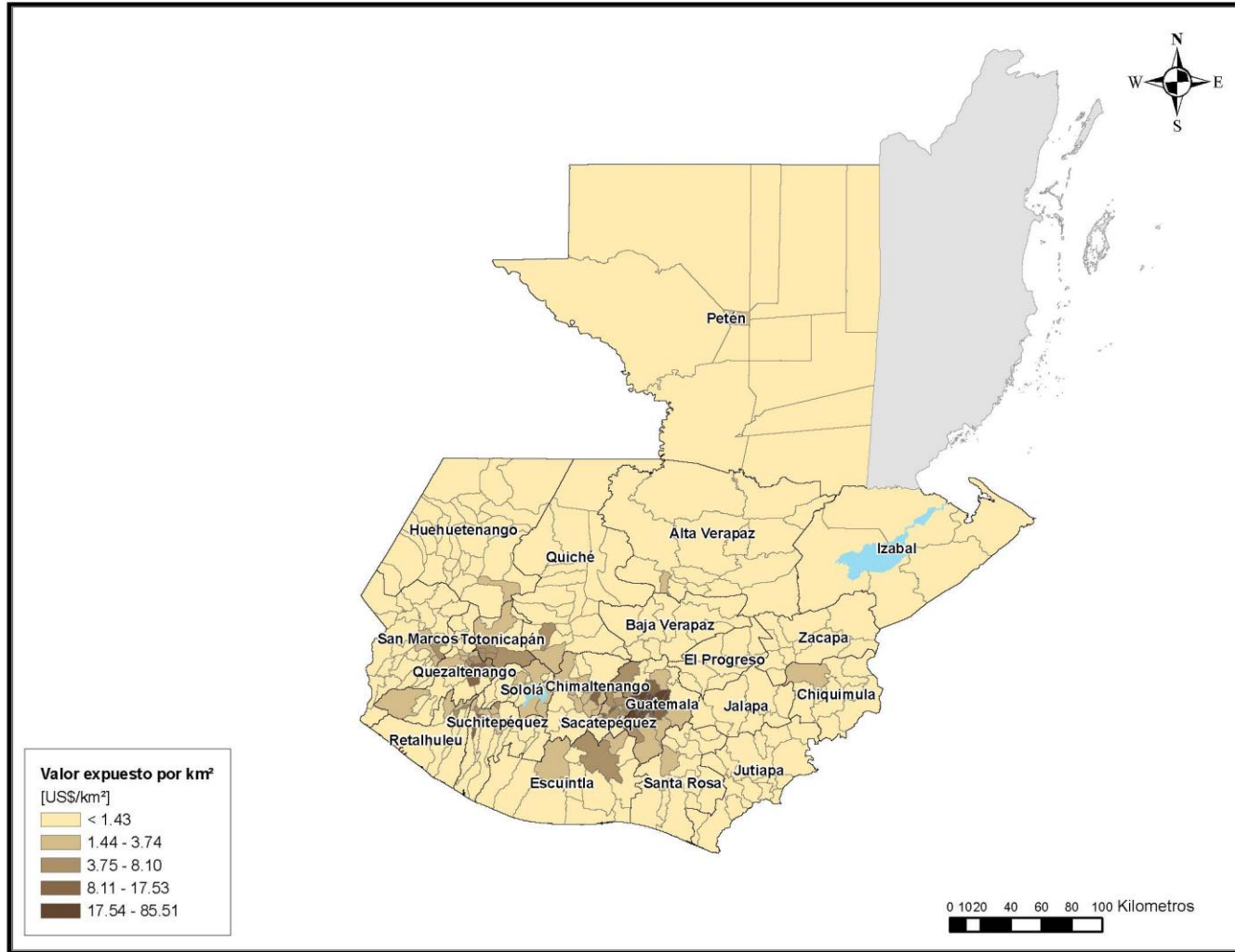
**Figura 83**  
Valores expuestos en infraestructura urbana por municipio



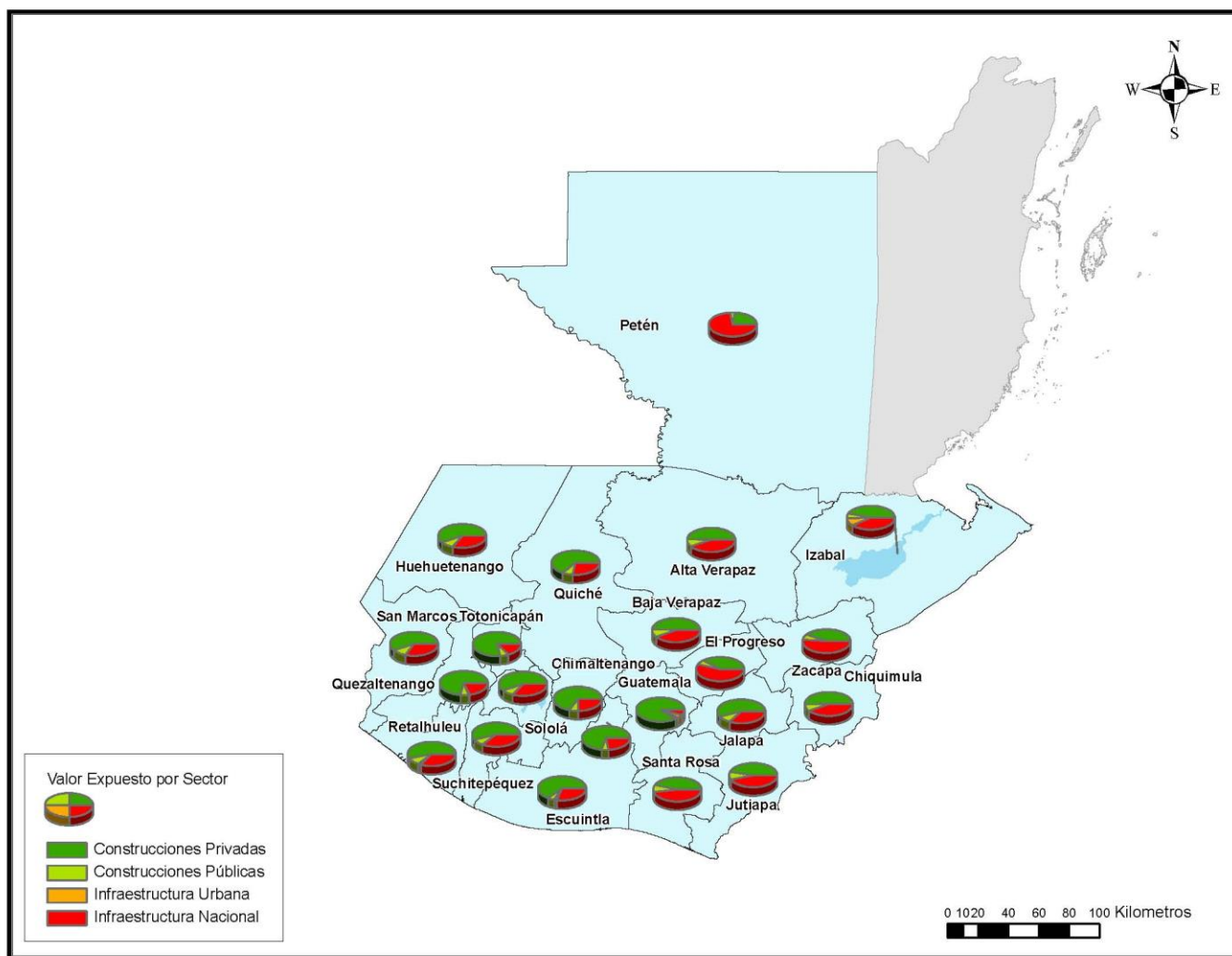
**Figura 84**  
Valores expuestos en infraestructura nacional por municipio



**Figura 85**  
Valor expuesto total por municipio



**Figura 86**  
Valor expuesto por km<sup>2</sup> de área por municipio



**Figura 87**

Distribución relativa de valores expuestos según sectores por departamentos

## **6. BASES DE EXPOSICIÓN DE POBLACIONES SELECCIONADAS**

Para la ciudad capital y algunas de las poblaciones seleccionadas en el país, se realizó un modelo de exposición a nivel detallado. Estos modelos se basan en el levantamiento de información digital mediante implementación de imágenes de satélite y fotografías aéreas, complementando con información estadística de censos de población e información oficial publicada. La información levantada, al igual que cualquier otro modelo de información aproximada, es susceptible de ser mejorada, actualizada y depurada mediante trabajo intenso de campo o mediante la disponibilidad de la información catastral detallada. Esta información deberá ser actualizada y complementada por la SE-CONRED una vez que los consultores locales hagan entrega de las bases de exposición de infraestructura crítica para el país.

Estas bases de exposición fueron levantadas por este grupo consultor para el proyecto CAPRA en Guatemala (ERN-AL, 2010). A continuación se presenta la información de exposición levantada para las poblaciones de *Ciudad de Guatemala, Ocos, Puerto Barrios, Santiago de Atitlán, Los Pocitos y Zacapa*.

### **6.1 Modelo de exposición para Ciudad de Guatemala**

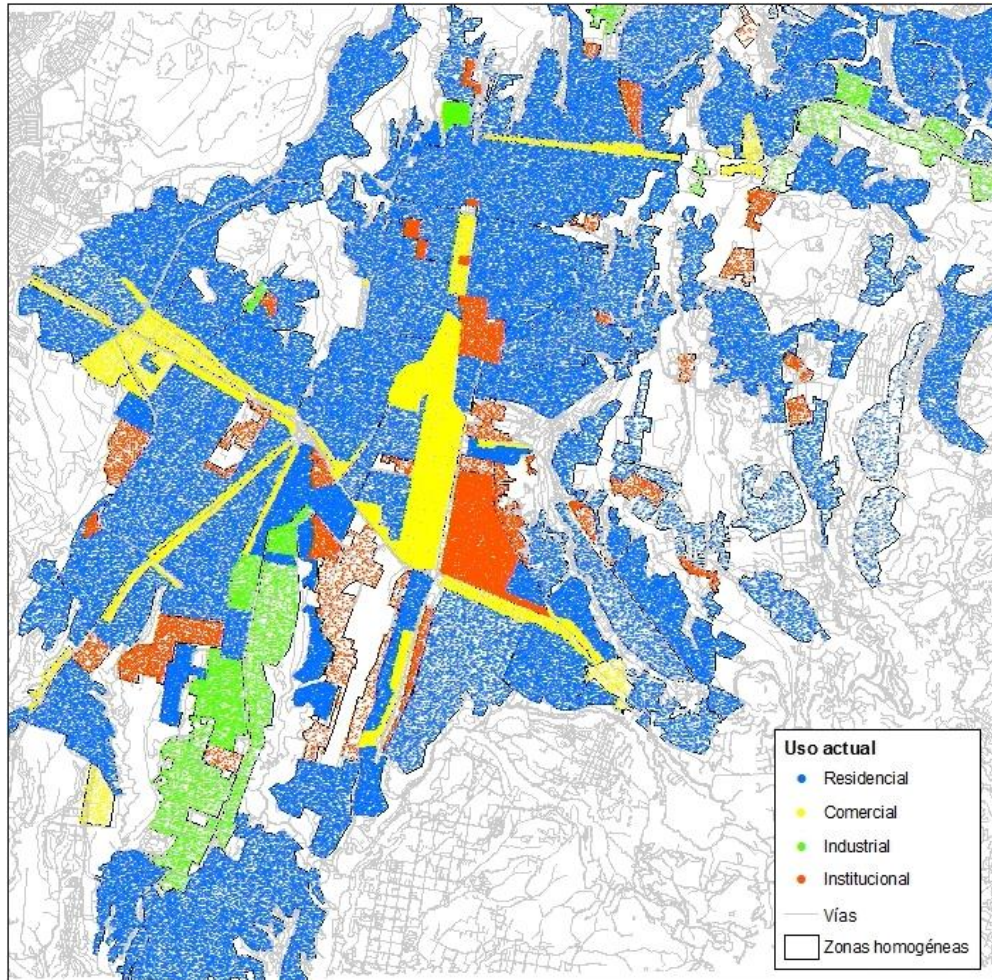
Para Ciudad de Guatemala no se cuenta con un censo poblacional que relacione el número actual de personas y su distribución o actividad económica. Tampoco se cuenta con una base de datos catastral, ni de información relacionada con sistemas constructivos, áreas de construcción, valores expuestos, fecha de construcción y otros datos que resultan de utilidad en la determinación de la exposición económica, humana y de la vulnerabilidad.

Debido a lo anterior se procedió a conformar la base de datos de exposición de edificaciones, con base en un levantamiento digital a partir de imágenes de satélite, complementado con estadísticas de población, fotografías, indicadores oficiales y conceptos de expertos locales.

La Figura 88 presenta una imagen de las zonas homogéneas de la ciudad. Estas zonas son de exposición homogénea, es decir, zonas en donde pueden identificarse condiciones de uso, niveles



de ocupación, costo y densidades de construcción similares. Cada zona es luego calificada en términos de porcentajes identificados de tipos constructivos, con relación a lo observado durante el levantamiento.



**Figura 88**

Mapa de zonas homogéneas de Ciudad de Guatemala

Estas zonas homogéneas fueron luego discretizadas, para simular los predios de la ciudad. El proceso de discretización consiste en ubicar aleatoriamente puntos dentro de cada zona homogénea, asignando a cada punto un costo y ocupación consistente con los valores identificados en la zona, y un tipo constructivo en función de los porcentajes previamente definidos. El número total de predios ubicados por zona es consistente con la densidad de construcciones identificada en el levantamiento.

Las condiciones de exposición de Ciudad de Guatemala, medidas en términos de valor de reposición y número de ocupantes de las edificaciones, se asigna mediante la interpretación de imágenes de satélite y fotografías de la zona, y mediante la consulta de indicadores oficiales publicados sobre densidad de ocupación, valoración económica y características de las construcciones. La Tabla 10 presenta algunos indicadores generales utilizados para generar la base de datos de exposición de edificaciones para esta población.

**Tabla 10**  
**Indicadores generales de exposición de edificaciones**

<b>Indicador</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Población total estimada	Hab	987,200
Área total de terreno urbano	km <sup>2</sup>	124.17
Densidad de población	Hab/km <sup>2</sup>	7,950
No. Total de Edificaciones		173,100
Área de construcción	m <sup>2</sup>	86,550 x10 <sup>3</sup>
Densidad construcción urbana	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> terreno urbano	0.70
Valoración total de construcciones	US\$ millones	14,985.20
Valor promedio/m <sup>2</sup> construido	US\$/m <sup>2</sup>	170

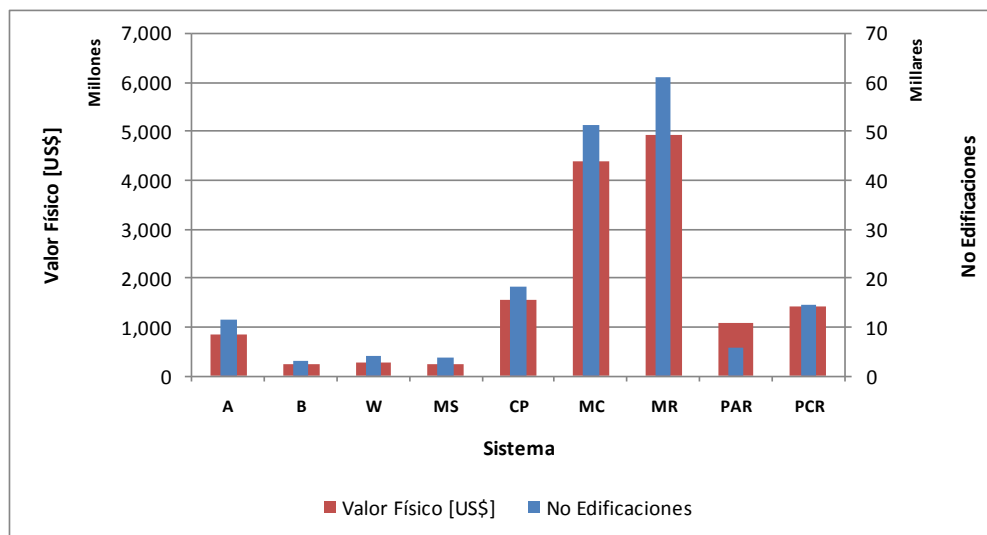
A continuación se presentan algunas estadísticas resultantes del proceso de conformación de la base de exposición de edificaciones. La Tabla 11 y la Figura 89 y Figura 90 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados. La descripción detallada de los sistemas estructurales se presenta en la sección 4 de este informe.



**Tabla 11**

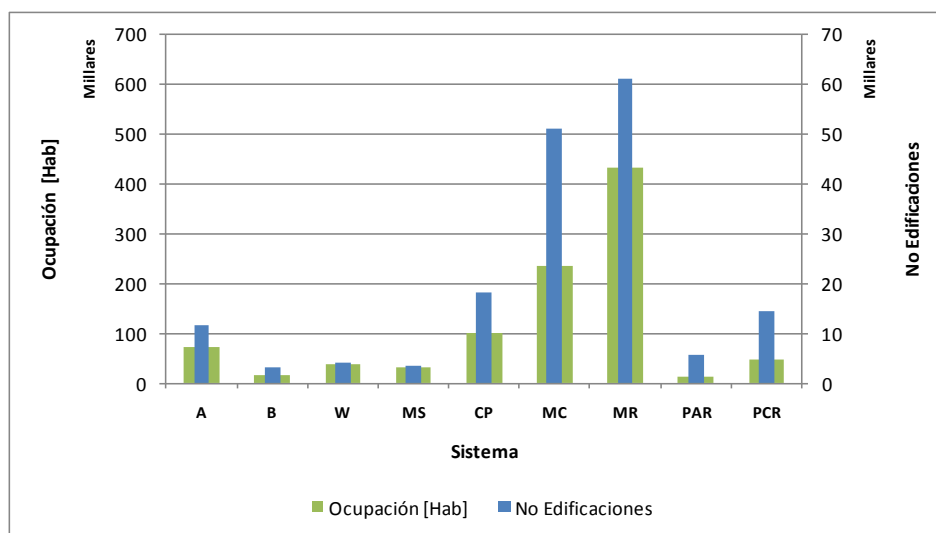
**Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales**

Sistema	Código Sistema	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
Adobe	A	11,582	851.57	73,738
Bahareque	B	3,047	229.43	15,235
Muros en madera	W	4,256	279.75	36,940
Mampostería simple	MS	3,620	234.28	32,065
Concreto prefabricado	CP	18,194	1,553.01	99,522
Mampostería confinada	MC	51,168	4,392.11	235,486
Mampostería reforzada	MR	61,153	4,937.94	434,284
Pórticos en acero	PAR	5,674	1,078.85	12,968
Pórticos en concreto	PCR	14,406	1,428.26	46,962
<b>Total</b>		<b>173,100</b>	<b>14,985.20</b>	<b>987,200</b>



**Figura 89**

Distribución de valores expuestos y edificaciones por sistemas estructurales



**Figura 90**

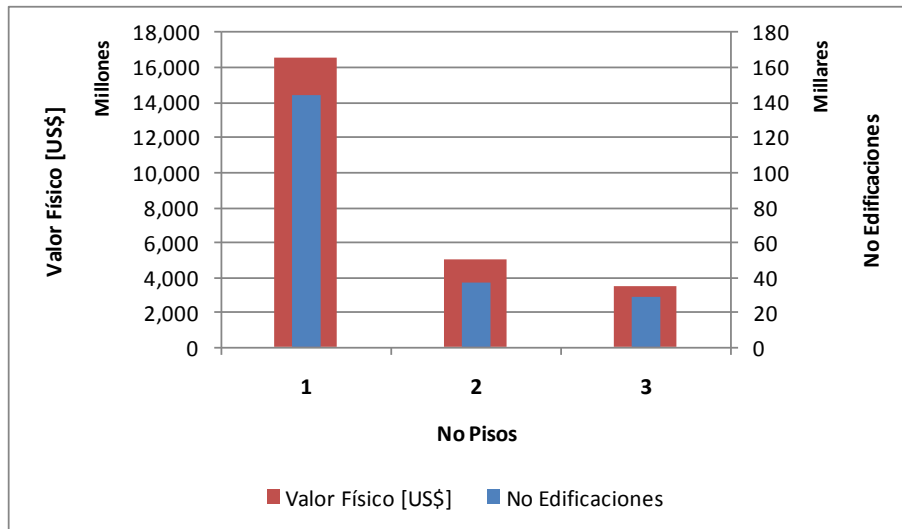
Distribución de ocupación y edificaciones por sistemas estructurales

Por otra parte, la Tabla 12 y la Figura 91 y Figura 92 muestran la distribución de valores expuestos y ocupación, en función del número de pisos de las edificaciones incluidas.

**Tabla 12**

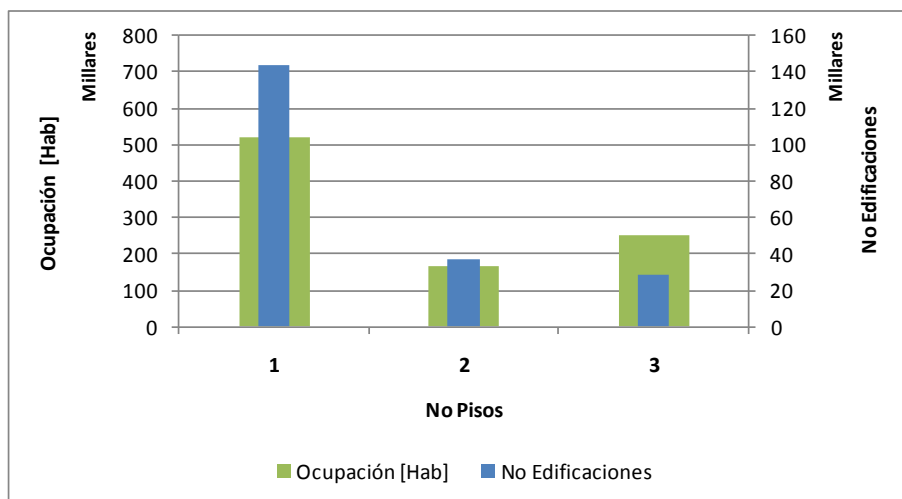
**Valores expuestos y ocupación por número de pisos**

No Pisos	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
1	24,905	1,993.58	305,634
2	110,170	8,600.51	563,343
3	25,074	3,001.11	81,533
4	12,951	1,390.00	36,690
<b>Total</b>	<b>173,100</b>	<b>14,985,20</b>	<b>987,200</b>



**Figura 91**

Distribución de valores expuestos y edificaciones por número de pisos



**Figura 92**

Distribución de ocupación y edificaciones por número de pisos

## 6.2 Modelo de exposición para Ocos

El municipio de Ocos fue levantado en resolución predio por predio, empleando imágenes satelitales y aéreas. Esta información es complementada con estadísticas de población, fotografías, indicadores oficiales y conceptos de expertos locales. La Figura 93 presenta una imagen de los predios digitalizados para el municipio de Ocos.



**Figura 93**

Mapa de predios de Ocos

(Imagen generada con Google Earth)

La Tabla 13 presenta algunos indicadores generales utilizados para generar la base de datos de exposición de edificaciones para esta población.

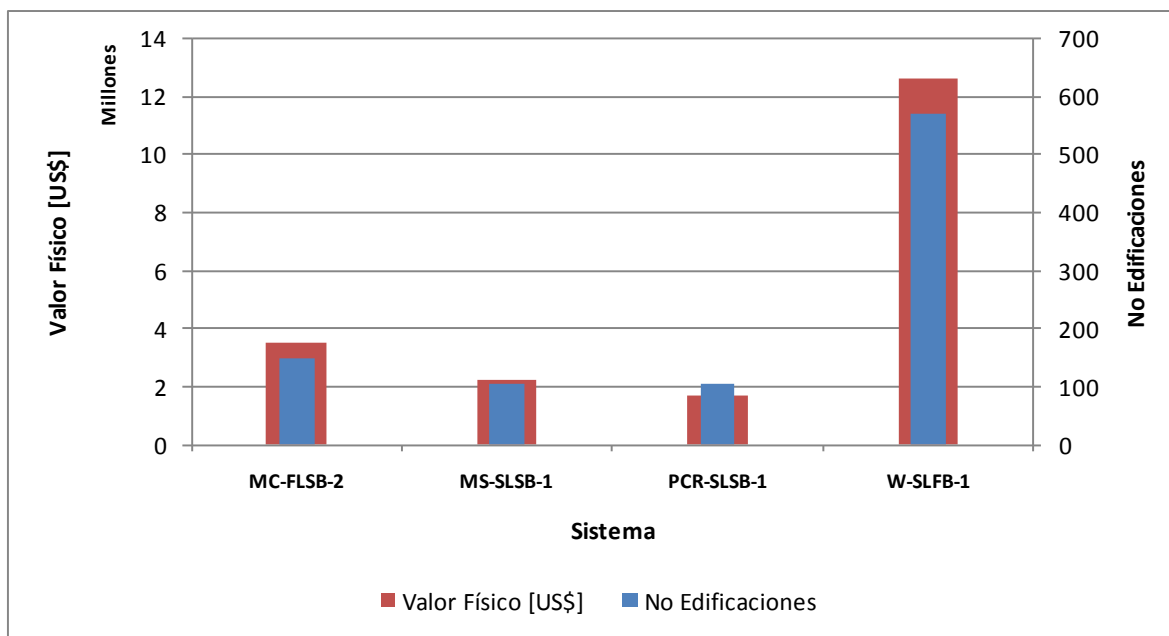
**Tabla 13**  
**Indicadores generales de exposición de edificaciones**

Indicador	Unidad	Valor
Población total estimada	Hab	7,120
Área total de terreno urbano	km <sup>2</sup>	1.30
Densidad de población	Hab/km <sup>2</sup>	5,480
No. total de Edificaciones		930
Área de construcción	m <sup>2</sup>	104 x10 <sup>3</sup>
Densidad construcción urbana	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> terreno urbano	0.18
Valoración total de construcciones	US\$ millones	20
Valor promedio/m <sup>2</sup> construido	US\$/m <sup>2</sup>	200

A continuación se presentan algunas estadísticas resultantes del proceso de conformación de la base de exposición de edificaciones. La Tabla 14, la Figura 94 y la Figura 95 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados. La descripción detallada de los sistemas estructurales se presenta en la sección 4 de este informe.

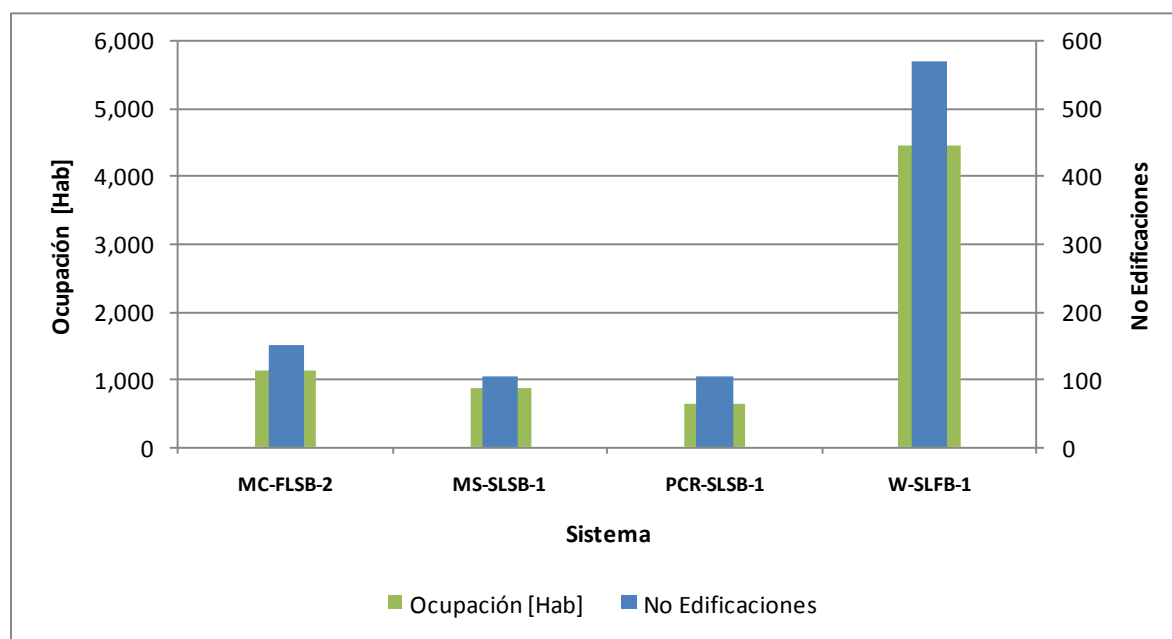
**Tabla 14**  
**Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales**

Sistema	Código Sistema	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
Mampostería confinada	MC-FLSB-2	150	3.50	1,145
Mampostería simple	MS-SLSB-1	105	2.25	868
Pórticos en concreto	PCR-SLSB-1	105	1.71	657
Madera	W-SLFB-1	570	12.60	4,450
<b>Total</b>		<b>930</b>	<b>20.06</b>	<b>7,120</b>



**Figura 94**

Distribución de valores expuestos y número de edificaciones por sistemas estructurales



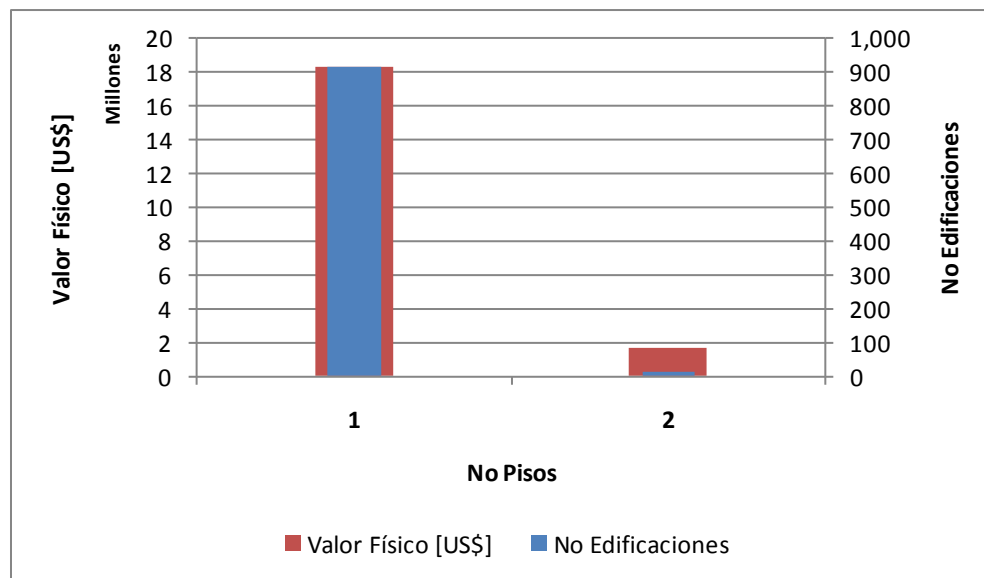
**Figura 95**

Distribución de ocupación y número de edificaciones por sistemas estructurales

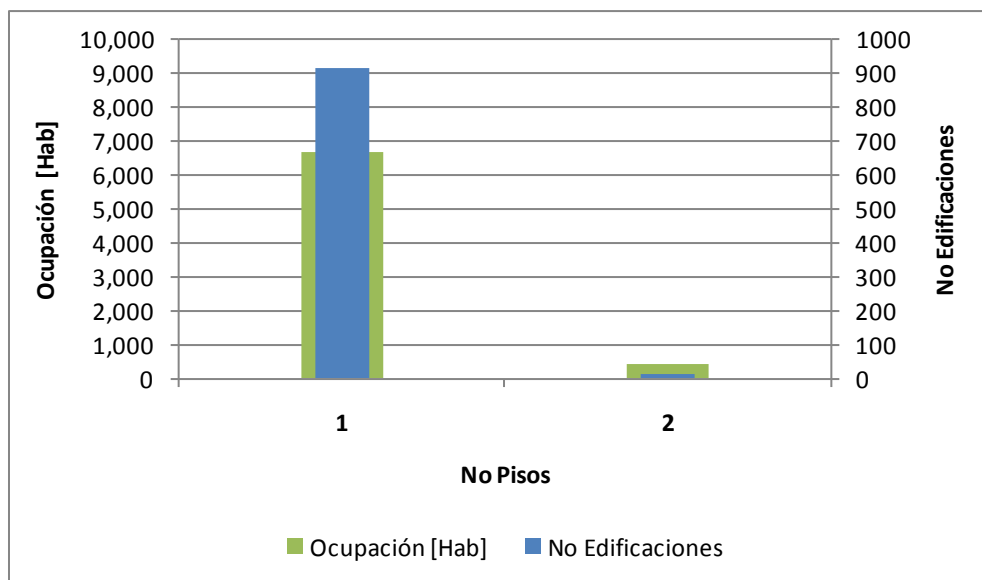
Por otra parte, la Tabla 15, la Figura 96 y la Figura 97 muestran la distribución de valores expuestos y ocupación, en función del número de pisos de las edificaciones incluidas.

**Tabla 15**  
**Valores expuestos y ocupación por número de pisos**

No Pisos	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
1	918	18.32	6,696
2	12	1.74	424
<b>Total</b>	<b>930</b>	<b>20.06</b>	<b>7,120</b>



**Figura 96**  
Distribución de valores expuestos y número de edificaciones por número de pisos



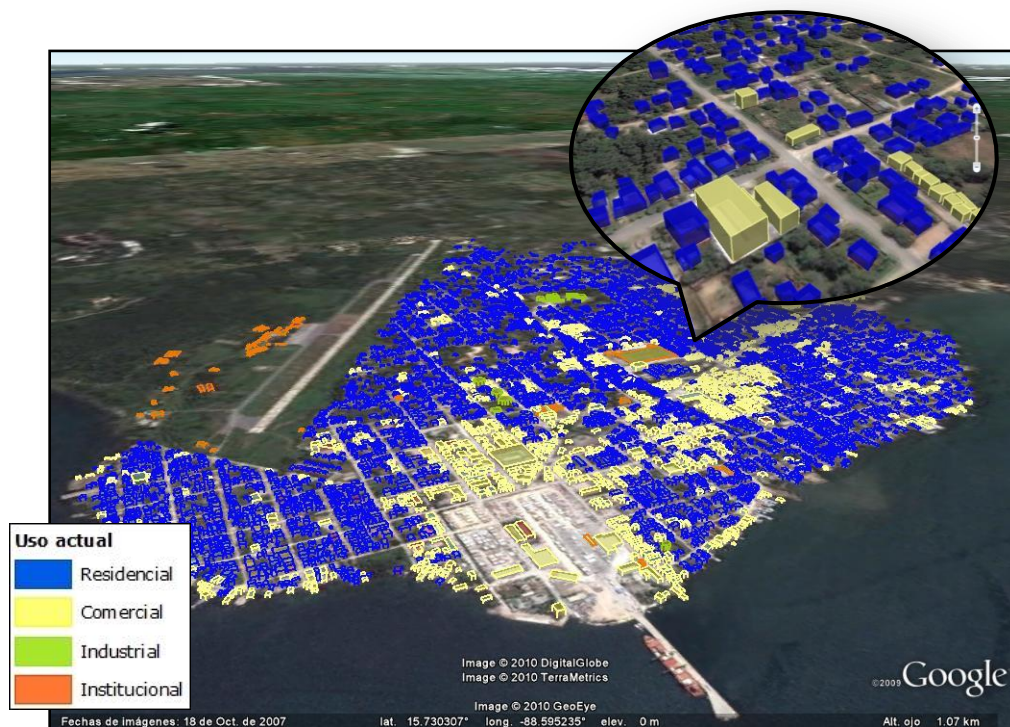
**Figura 97**

Distribución de ocupación y número de edificaciones por número de pisos

### 6.3 Modelo de exposición para Puerto Barrios

El municipio de Puerto Barrios fue levantado en resolución predio por predio, empleando imágenes satelitales y aéreas. Esta información es complementada con estadísticas de población, fotografías, indicadores oficiales y conceptos de expertos locales. La Figura 98 presenta una imagen de los predios digitalizados para el municipio de Puerto Barrios.





**Figura 98**

Mapa de predios de Puerto Barrios  
(Imagen generada con Google Earth)

La Tabla 16 presenta algunos indicadores generales utilizados para generar la base de datos de exposición de edificaciones para esta población.

**Tabla 16**

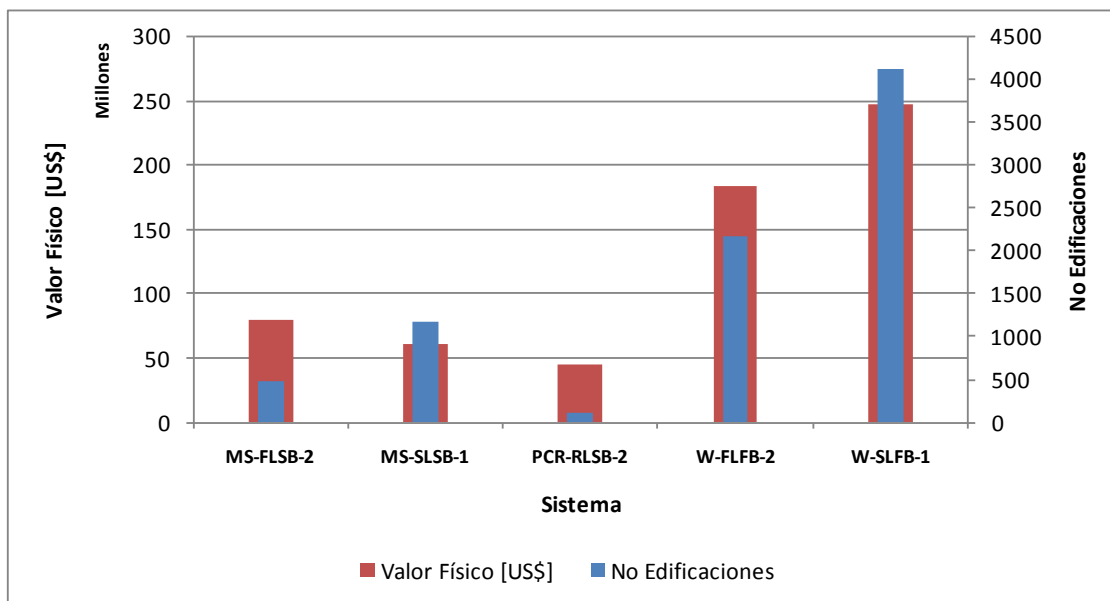
**Indicadores generales de exposición de edificaciones**

Indicador	Unidad	Valor
Población total estimada	Hab	55,340
Área total de terreno urbano	km <sup>2</sup>	8.38
Densidad de población	Hab/km <sup>2</sup>	6,603
No. total de Edificaciones		8,077
Área de construcción	m <sup>2</sup>	1545 x10 <sup>3</sup>
Densidad construcción urbana	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> terreno urbano	0.18
Valoración total de construcciones	US\$ millones	617
Valor promedio/m <sup>2</sup> construido	US\$/m <sup>2</sup>	400

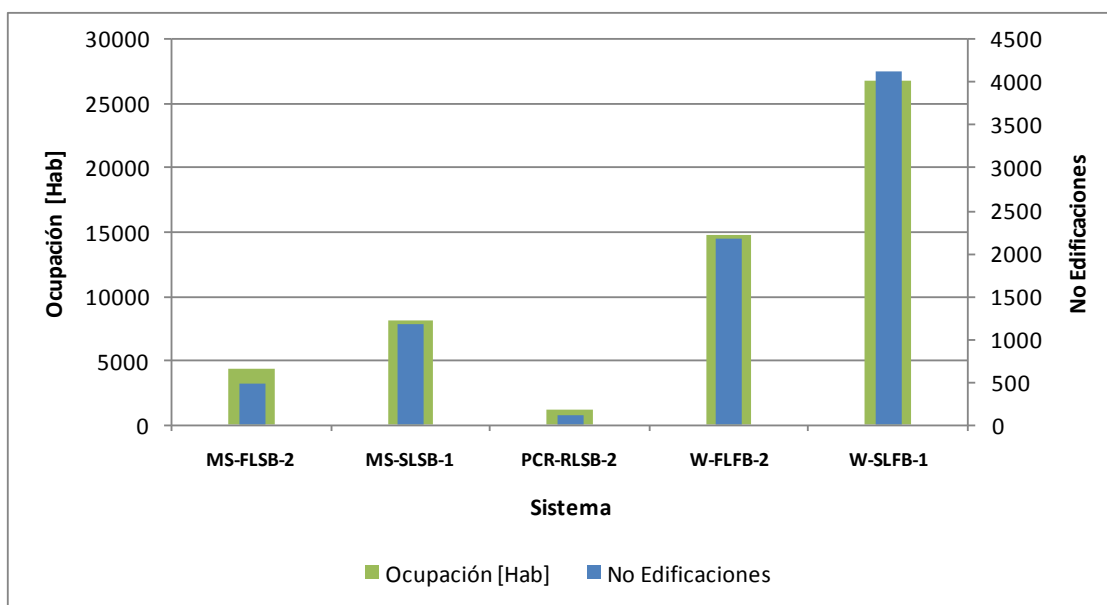
A continuación se presentan algunas estadísticas resultantes del proceso de conformación de la base de exposición de edificaciones. La Tabla 17, la Figura 99 y la Figura 100 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados. La descripción detallada de los sistemas estructurales se presenta en la sección 4 de este informe.

**Tabla 17**  
**Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales**

Sistema	Código	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
Mampostería Simple 2 pisos	MS-FLSB-2	485	80.10	4,339
Mampostería Simple 1 piso	MS-SLSB-1	1,169	61.19	8,108
Concreto	PCR-RLSB-2	118	45.18	1,270
Madera 2 pisos	W-FLFB-2	2,181	183.97	14,785
Madera 1 piso	W-SLFB-1	4,124	247.20	26,838
<b>Total</b>		<b>8,077</b>	<b>617.63</b>	<b>55,340</b>



**Figura 99**  
Distribución de valores expuestos y número de edificaciones por sistemas estructurales



**Figura 100**

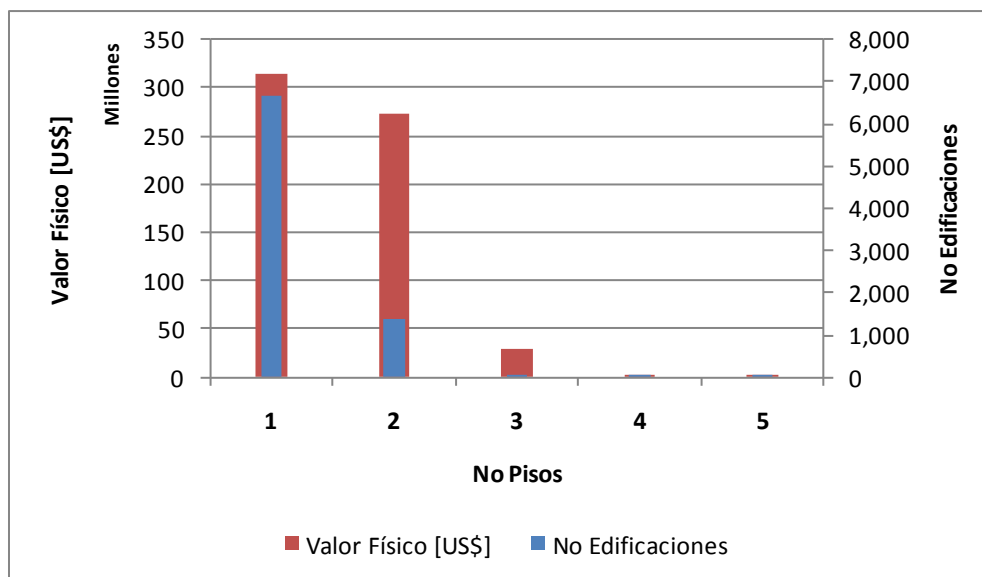
Distribución de ocupación y número de edificaciones por sistemas estructurales

Por otra parte, la Tabla 18, la Figura 101 y Figura 102 muestran la distribución de valores expuestos y ocupación, en función del número de pisos de las edificaciones incluidas.

**Tabla 18**

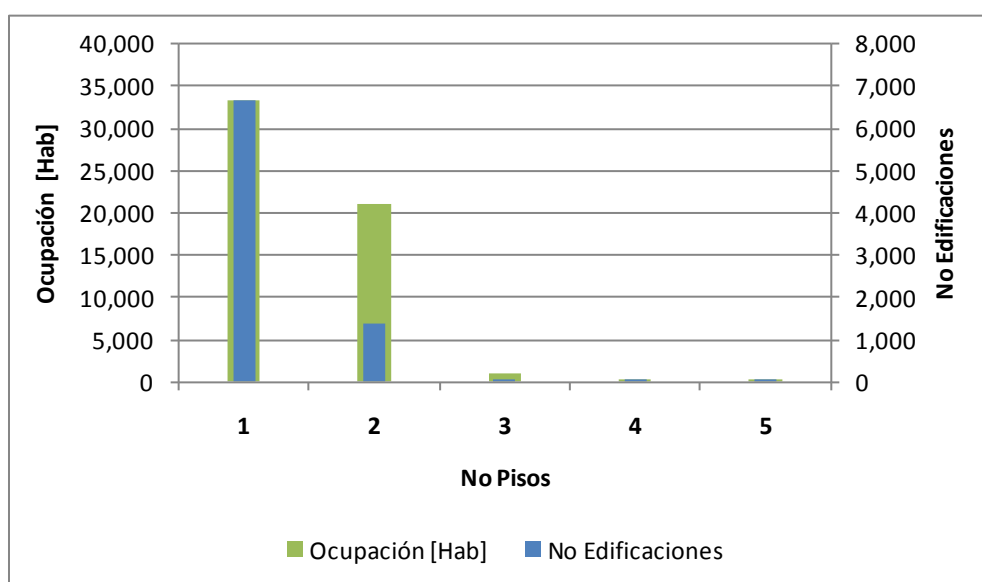
**Valores expuestos y ocupación por número de pisos**

No Pisos	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
1	6,680	313.41	33,339
2	1,362	273.63	20,969
3	32	28.36	901
4	1	1.45	50
5	2	780.85	81
<b>Total</b>	<b>8,077</b>	<b>617.63</b>	<b>55,340</b>



**Figura 101**

Distribución de valores expuestos y número de edificaciones por número de pisos



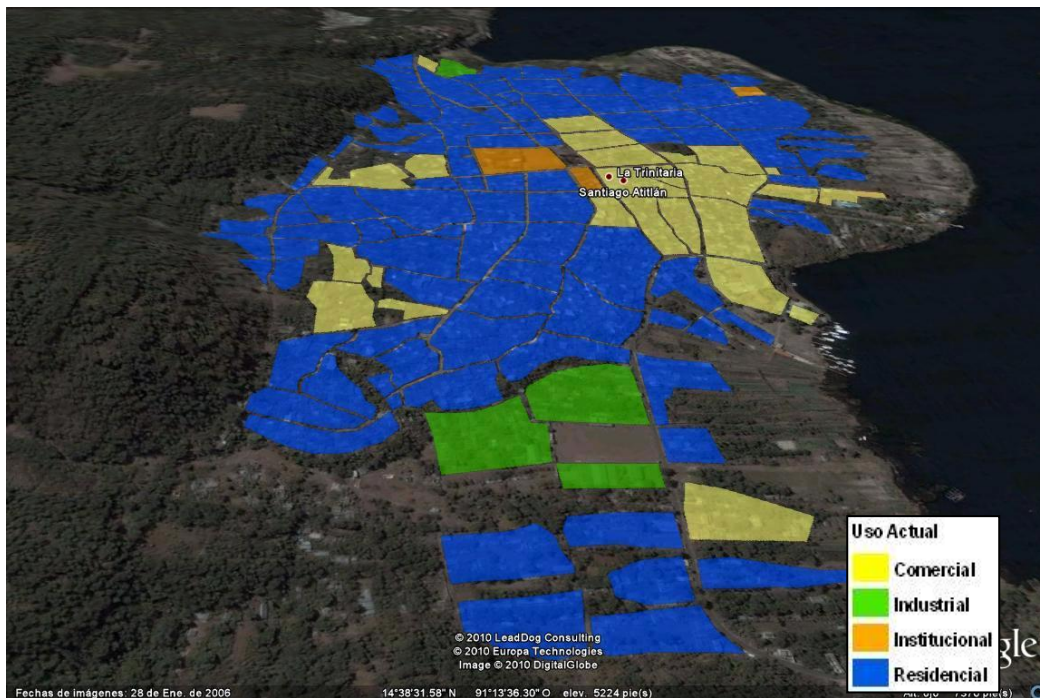
**Figura 102**

Distribución de ocupación y número de edificaciones por número de pisos

#### 6.4 Modelo de exposición para Santiago de Atitlán

El municipio de Santiago de Atitlán fue levantado en resolución de manzanas homogéneas, empleando imágenes satelitales y aéreas. Esta información es complementada con estadísticas de población, fotografías, indicadores oficiales y conceptos de expertos.

La Figura 103 presenta una imagen de las manzanas homogéneas de la ciudad. Cada manzana es luego calificada en términos de porcentajes identificados de tipos constructivos, con relación a lo observado durante el levantamiento.



**Figura 103**

Mapa de manzanas homogéneas del municipio de Santiago de Atitlán

(Imagen generada con Google Earth)

Estas manzanas homogéneas fueron luego discretizadas, para simular los predios del municipio. El proceso de discretización consiste en ubicar aleatoriamente puntos dentro de cada manzana homogénea, asignando a cada punto un costo y ocupación consistente con los valores identificados en la manzana, y un tipo constructivo en función de los porcentajes previamente

definidos. El número total de predios ubicados por manzana es consistente con la densidad de construcciones identificada en el levantamiento.

La Tabla 19 presenta algunos indicadores generales utilizados para generar la base de datos de exposición de edificaciones para esta población.

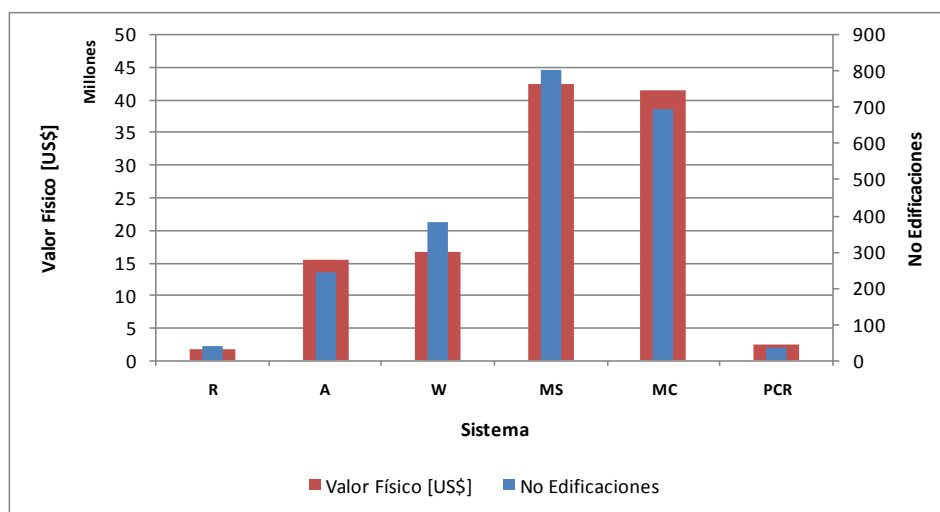
**Tabla 19**  
**Indicadores generales de exposición de edificaciones**

Indicador	Unidad	Valor
Población total estimada	Hab	19,490
Área total de terreno urbano	km <sup>2</sup>	1.25
Densidad de población	Hab/km <sup>2</sup>	15,575
No. total de Edificaciones		2,200
Área de construcción	m <sup>2</sup>	440 x10 <sup>3</sup>
Densidad construcción urbana	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> terreno urbano	0.35
Valoración total de construcciones	US\$ millones	120
Valor promedio/m <sup>2</sup> construido	US\$/m <sup>2</sup>	273.53

A continuación se presentan algunas estadísticas resultantes del proceso de conformación de la base de exposición de edificaciones. La Tabla 20, la Figura 104 y la Figura 105 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados. La descripción detallada de los sistemas estructurales se presenta en la sección 4 de este informe.

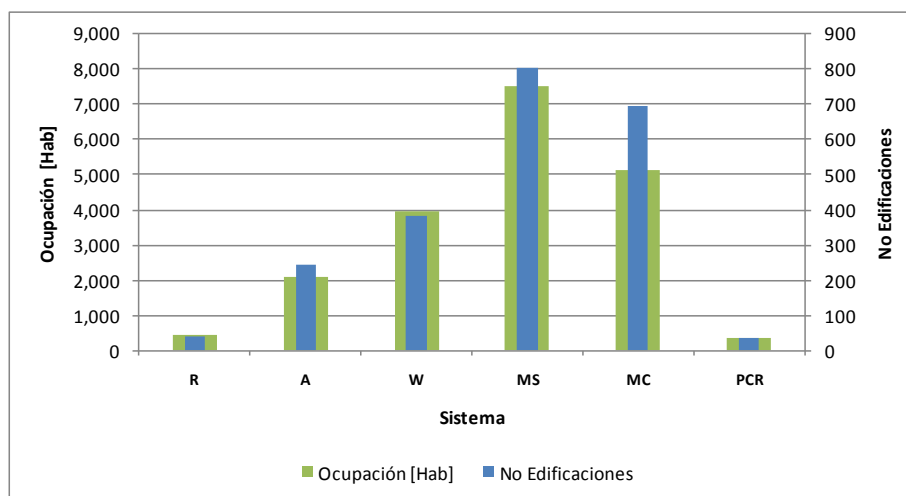
**Tabla 20**  
**Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales**

Sistema	Código Sistema	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
Ripio	R	40	1.58	423
Adobe	A	244	15.37	2,092
Muros en madera	W	382	16.71	3,963
Mampostería Simple	MS	804	42.47	7,521
Mampostería confinada	MC	697	41.58	5,125
Pórticos en concreto RM	PCR	33	2.51	366
<b>Total</b>		<b>2,200</b>	<b>120.23</b>	<b>19,490</b>



**Figura 104**

Distribución de valores expuestos y edificaciones por sistemas estructurales



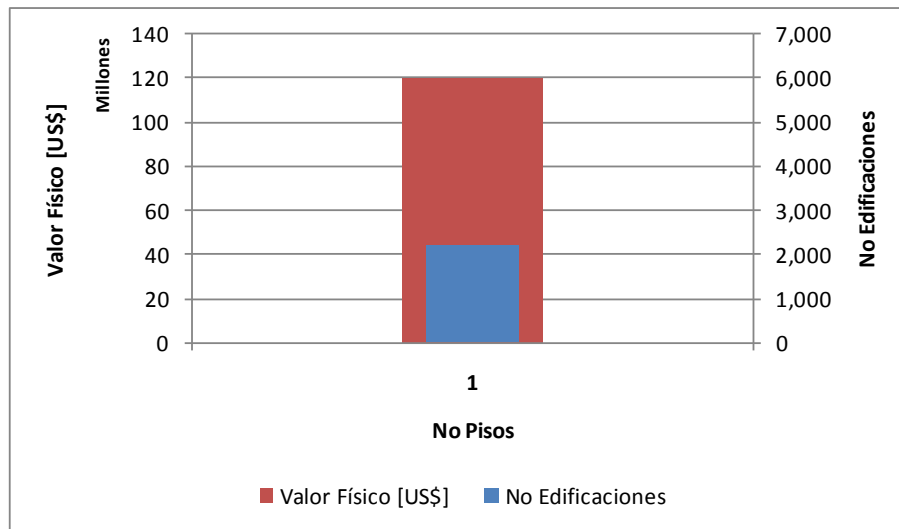
**Figura 105**

Distribución de ocupación y edificaciones por sistemas estructurales

Por otra parte, la Tabla 21 y la Figura 106 y Figura 107 muestran la distribución de valores expuestos y ocupación, en función del número de pisos de las edificaciones incluidas.

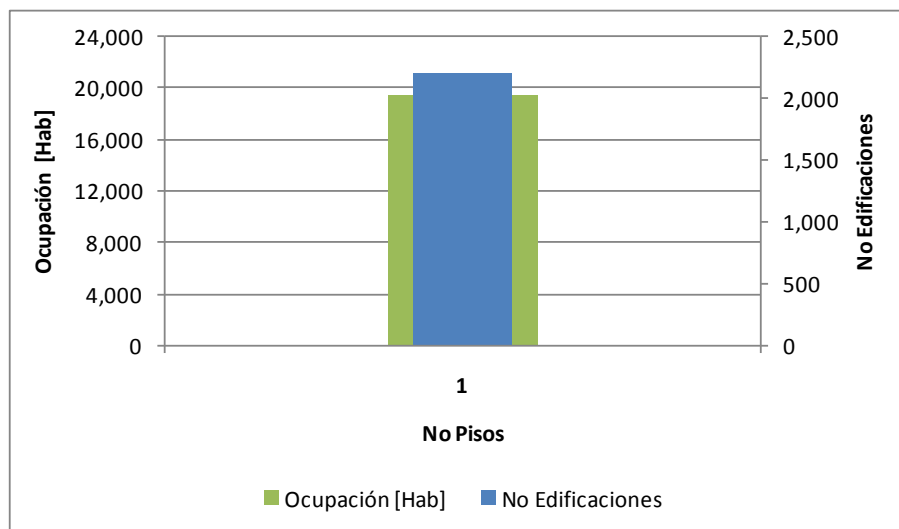
**Tabla 21**  
**Valores expuestos y ocupación por número de pisos**

No Pisos	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
1	2,200	120.23	19,490
<b>Total</b>	<b>2,200</b>	<b>120.23</b>	<b>19,490</b>



**Figura 106**

Distribución de valores expuestos y número de edificaciones por número de pisos



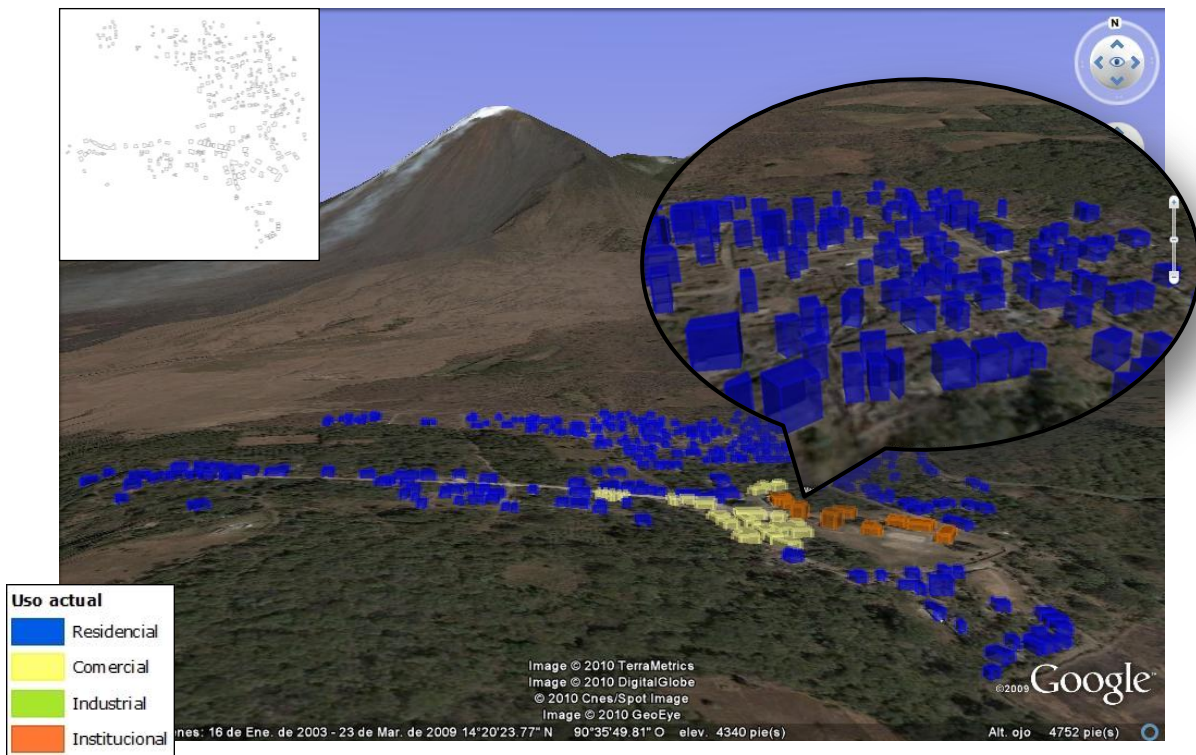
**Figura 107**

Distribución de ocupación y número de edificaciones por número de pisos



## 6.5 Modelo de exposición para Los Pocitos

El municipio de Los Pocitos fue levantado en resolución predio por predio, empleando imágenes satelitales y aéreas. Esta información es complementada con estadísticas de población, fotografías, indicadores oficiales y conceptos de expertos locales. La Figura 108 presenta una imagen de los predios digitalizados para Los Pocitos.



**Figura 108**

Mapa de predios de Los Pocitos

(Imagen generada con Google Earth. Recuadro: proyección plana)

La Tabla 22 presenta algunos indicadores generales utilizados para generar la base de datos de exposición de edificaciones para esta población.

**Tabla 22**

**Indicadores generales de exposición de edificaciones**

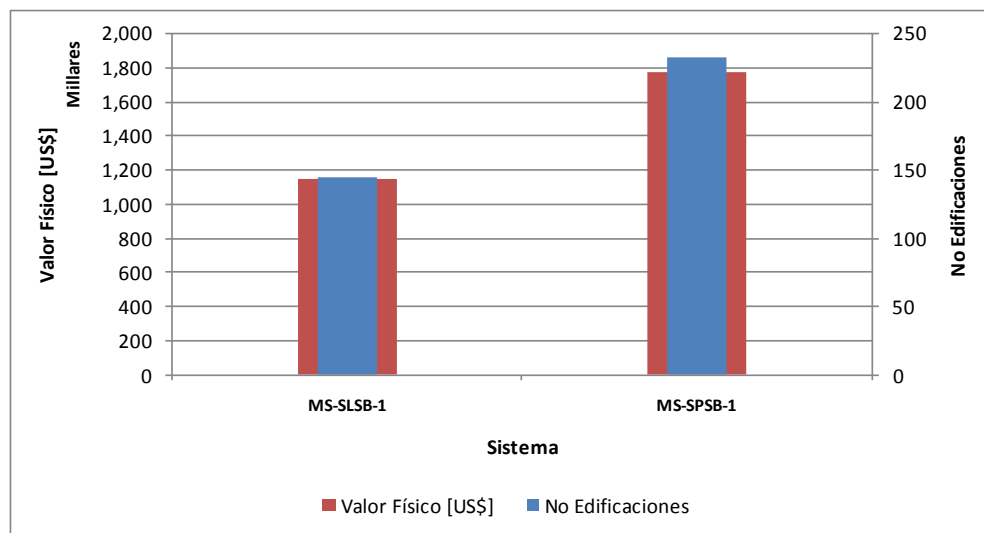
<b>Indicador</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>
Población total estimada	Hab	1,239
Área total de terreno urbano	km <sup>2</sup>	0.17
Densidad de población	Hab/km <sup>2</sup>	7,213
No. total de Edificaciones		378
Área de construcción	m <sup>2</sup>	21 x10 <sup>3</sup>
Densidad construcción urbana	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> terreno urbano	0.12
Valoración total de construcciones	US\$ millones	2.93
Valor promedio/m <sup>2</sup> construido	US\$/m <sup>2</sup>	138

A continuación se presentan algunas estadísticas resultantes del proceso de conformación de la base de exposición de edificaciones. La Tabla 23, la Figura 109 y la Figura 110 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados. La descripción detallada de los sistemas estructurales se presenta en la sección 4 de este informe.

**Tabla 23**

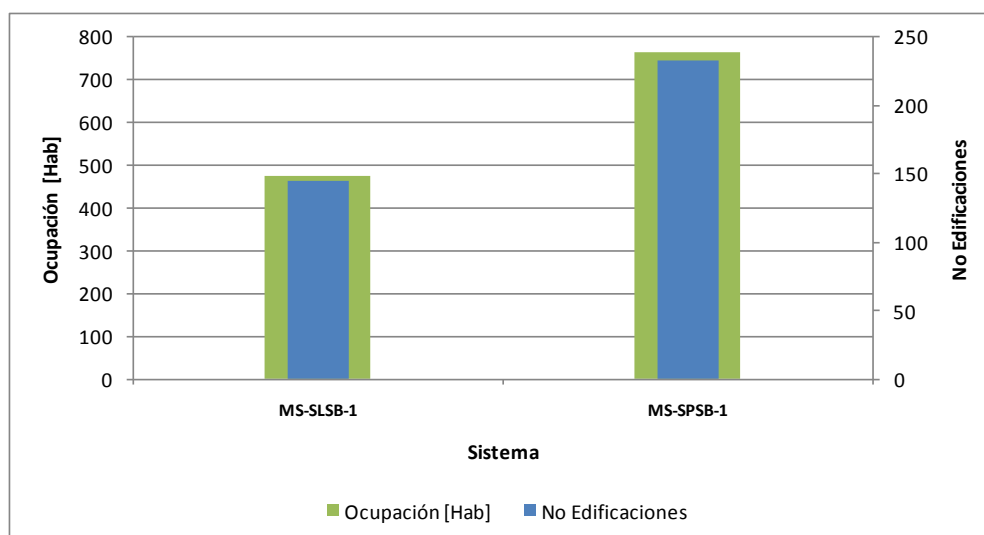
**Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales**

<b>Sistema</b>	<b>Código Sistema</b>	<b>No Edificaciones</b>	<b>Valor Físico [US\$]</b>	<b>Ocupación [Hab]</b>
Mampostería simple - cubierta liviana	MS-SLSB-1	145	1,151,131	476
Mampostería simple - cubierta pesada	MS-SPSB-1	233	1,778,350	763
<b>Total</b>		<b>378</b>	<b>2,929,481</b>	<b>1,239</b>



**Figura 109**

Distribución de valores expuestos y edificaciones por sistemas estructurales



**Figura 110**

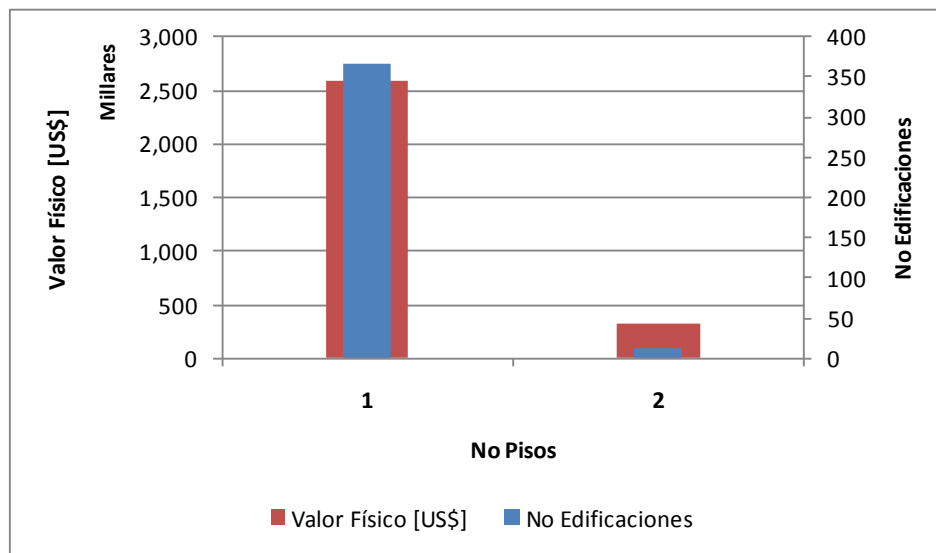
Distribución de ocupación y edificaciones por sistemas estructurales

Por otra parte, la Tabla 24, la Figura 111 y la Figura 112 muestran la distribución de valores expuestos y ocupación, en función del número de pisos de las edificaciones incluidas.

**Tabla 24**

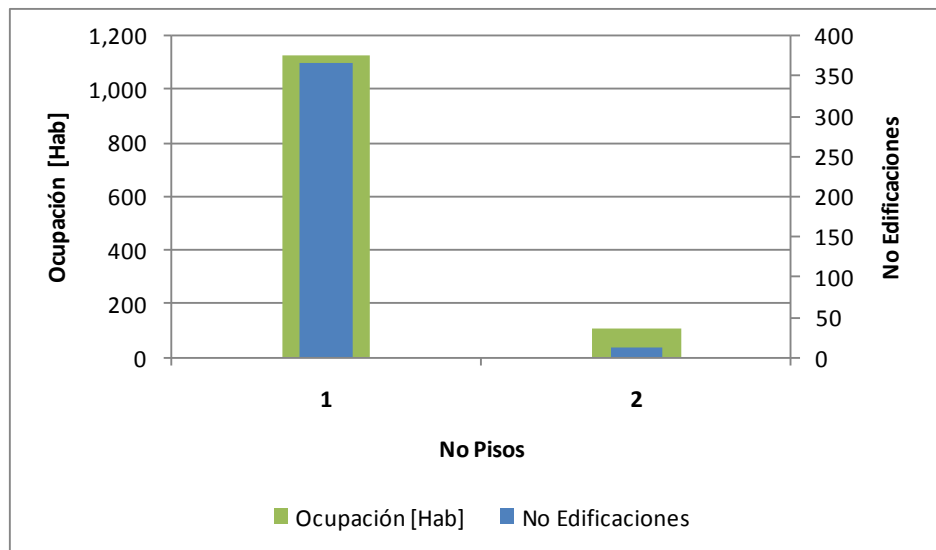
**Valores expuestos y ocupación por número de pisos**

No Pisos	No Edificaciones	Valor Físico [US\$]	Ocupación [Hab]
1	366	2,596,717	1,128
2	12	332,764	111
<b>Total</b>	<b>378</b>	<b>2,929,481</b>	<b>1,239</b>



**Figura 111**

Distribución de valores expuestos y número de edificaciones por número de pisos

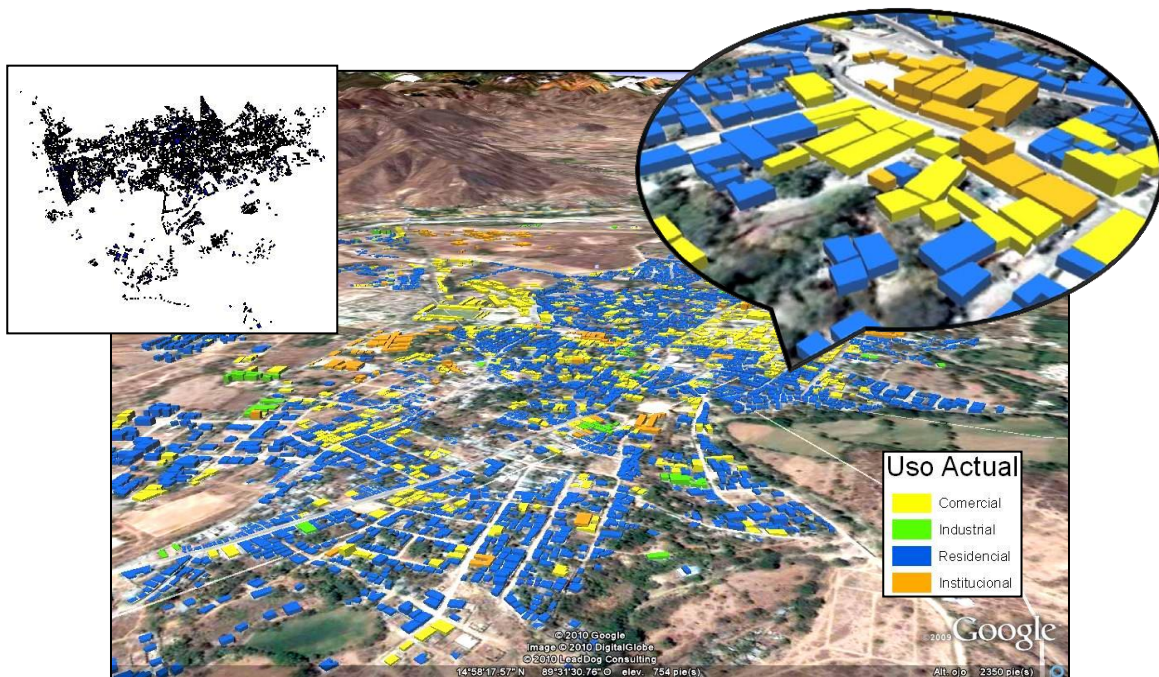


**Figura 112**

Distribución de ocupación y número de edificaciones por número de pisos

## 6.6 Modelo de exposición para Zacapa

El municipio de Zacapa fue levantado en resolución predio por predio, empleando imágenes satelitales y aéreas. Esta información es complementada con estadísticas de población, fotografías, indicadores oficiales y conceptos de expertos locales. La Figura 113 presenta una imagen de los predios para la ciudad de Zacapa.



**Figura 113**

Mapa de predios de Zacapa

(Imagen generada con Google Earth. Recuadro: proyección plana)

La Tabla 25 presenta algunos indicadores generales utilizados para generar la base de datos de exposición de edificaciones para esta población.

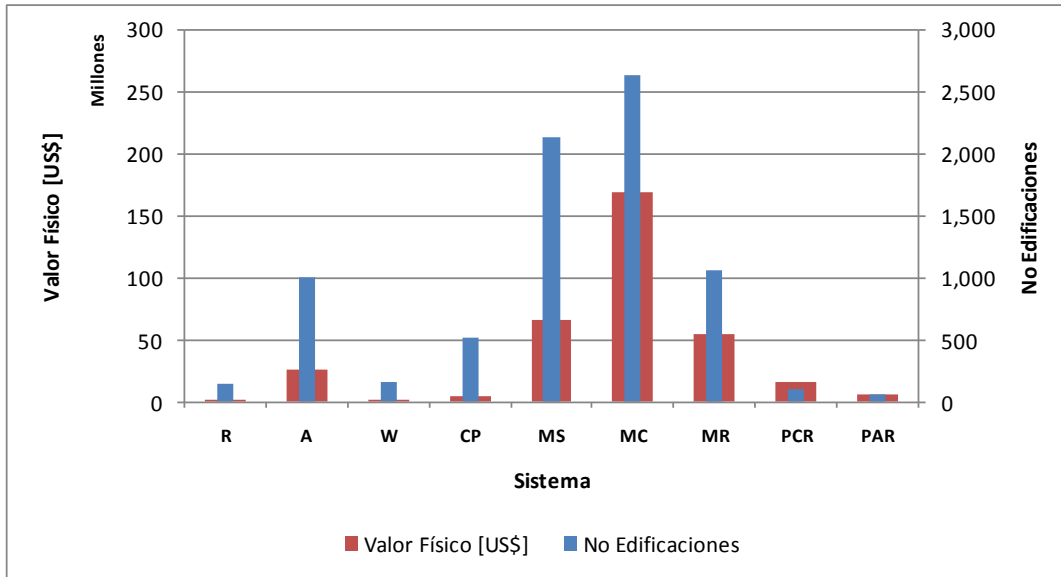
**Tabla 25**  
**Indicadores generales de exposición de edificaciones**

Indicador	Unidad	Valor
Población total estimada	Hab	31,358
Área total de terreno urbano	km <sup>2</sup>	6.29
Densidad de población	Hab/km <sup>2</sup>	4,983
No. total de Edificaciones		7,872
Área de construcción	m <sup>2</sup>	973 x10 <sup>3</sup>
Densidad construcción urbana	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> terreno urbano	0.15
Valoración total de construcciones	US\$ millones	348
Valor promedio/m <sup>2</sup> construido	US\$/m <sup>2</sup>	358

A continuación se presentan algunas estadísticas resultantes del proceso de conformación de la base de exposición de edificaciones La Tabla 26, la Figura 114 y la Figura 115 presentan la distribución general de valores expuestos y ocupación de edificaciones, para los diferentes tipos estructurales identificados. La descripción detallada de los sistemas estructurales se presenta en la sección 4 de este informe.

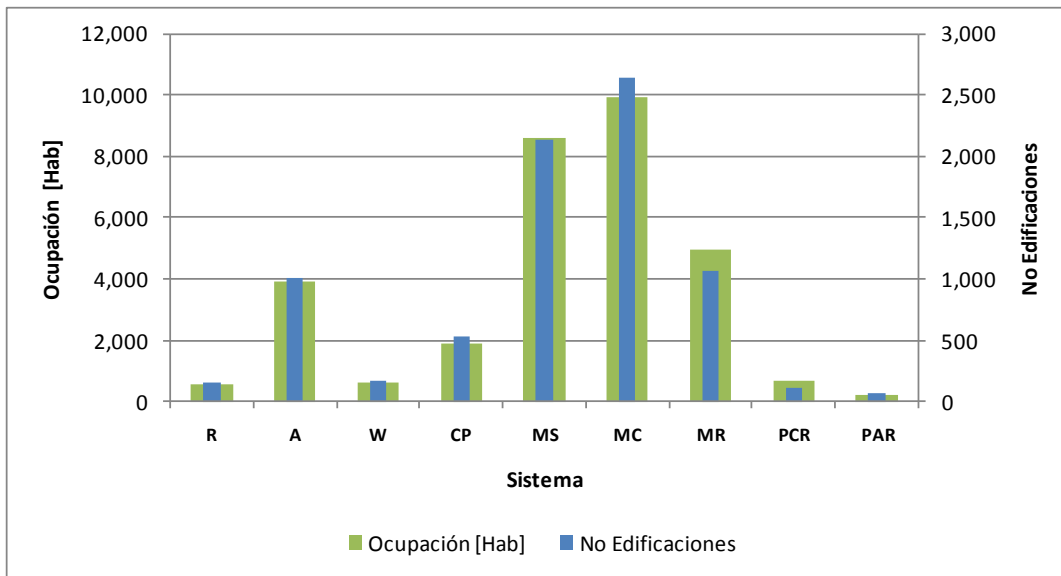
**Tabla 26**  
**Valores expuestos y ocupación por sistemas estructurales**

Sistema	Código Sistema	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
Ripio	R	155	1.46	539
Adobe	A	1,012	26.16	3,911
Madera	W	165	1.60	591
Concreto prefabricado	CP	526	5.20	1,906
Mampostería simple	MS	2,134	65.75	8,608
Mampostería confinada	MC	2,638	169.11	9,898
Mampostería reforzada	MR	1,066	55.34	4,976
Pórticos en concreto RM	PCR	109	16.52	698
Pórticos en acero RM	PAR	67	7.02	231
<b>Total</b>		<b>7,872</b>	<b>348.17</b>	<b>31,358</b>



**Figura 114**

Distribución de valores expuestos y edificaciones por sistemas estructurales



**Figura 115**

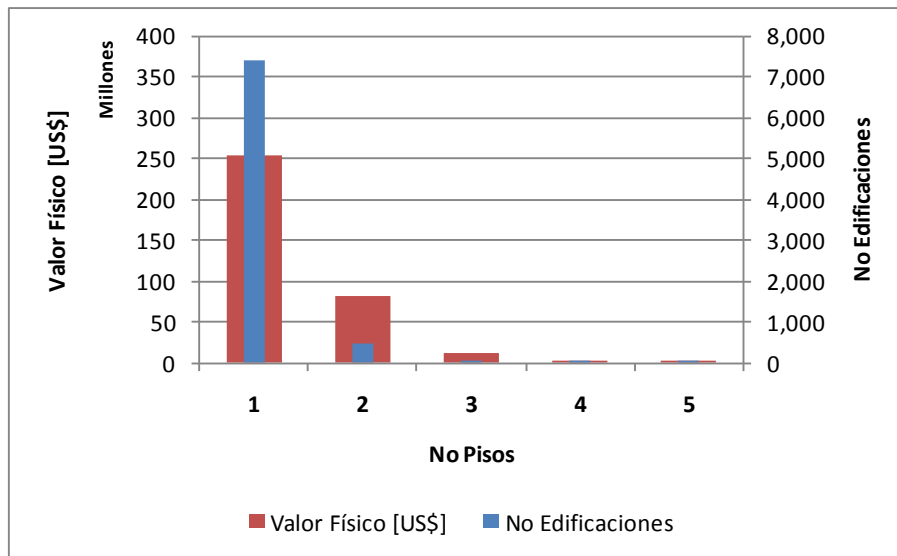
Distribución de ocupación y edificaciones por sistemas estructurales



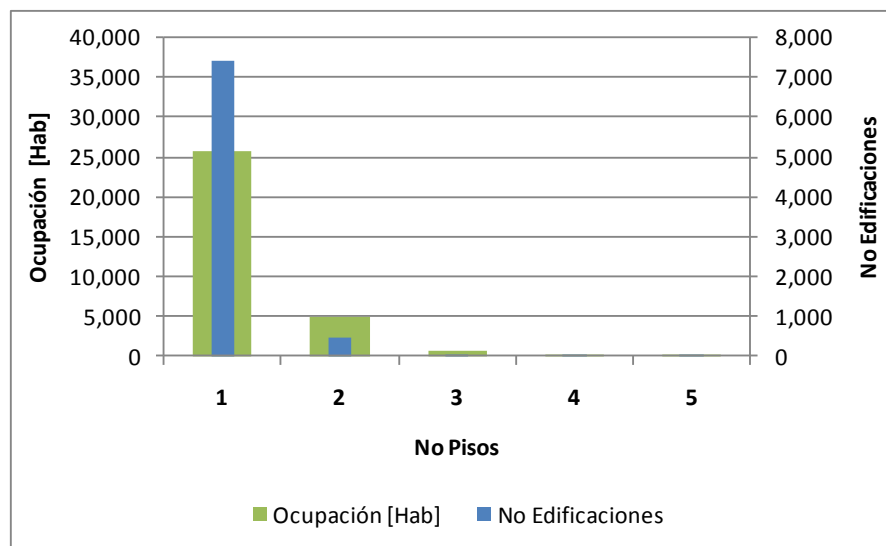
Por otra parte, la Tabla 27, la Figura 116 y la Figura 117 muestran la distribución de valores expuestos y ocupación, en función del número de pisos de las edificaciones incluidas.

**Tabla 27**  
**Valores expuestos y ocupación por número de pisos**

No Pisos	No Edificaciones	Valor Físico [US\$ millones]	Ocupación [Hab]
1	7,392	253.56	25,652
2	455	82.02	4,943
3	22	11.03	686
4	2	0.34	17
5	1	1.22	60
<b>Total</b>	<b>7,872</b>	<b>348.17</b>	<b>31,358</b>



**Figura 116**  
Distribución de valores expuestos y edificaciones por número de pisos



**Figura 117**  
Distribución de ocupación y edificaciones por número de pisos

## **7. TIPOS CONSTRUCTIVOS Y FUNCIONES DE VULNERABILIDAD**

### **7.1 Clasificación de tipos constructivos predominantes**

Los tipos constructivos predominantes fueron determinados por este grupo consultor para el proyecto CAPRA Guatemala (ERN-AL, 2010). La clasificación de cada uno de los tipos constructivos dominantes en Guatemala, se realizó mediante visitas de inspección y documentación previamente existente. Para cada uno de los tipos identificados se realizó un levantamiento detallado de información en edificaciones representativas.

Para realizar la clasificación básica se utiliza como referencia la información estructural, relacionada con el sistema estructural, el material dominante en dicho sistema, y características tales como tipo de entrepisos y cubierta, altura, luces típicas, geometría y otras. Una vez caracterizados los tipos estructurales dominantes, se realiza una sub-clasificación para efectos de la vulnerabilidad ante fuerzas de viento. Esta incluye, además de lo anterior, la descripción del tipo de fachada, el tipo de cubierta y detalles de conexiones de estos elementos a la estructura.

En resumen, con la información levantada para cada tipo constructivo dominante es posible establecer una clasificación general para asignación de vulnerabilidad ante vientos huracanados.


Cada uno de los tipos constructivos se caracteriza de acuerdo con:


- Características generales de la edificación (rango tipo de número de pisos, luces típicas, luces máximas de cubierta, otras).
- Sistema estructural y material de la estructura principal.
- Material y sistema de entrepiso.
- Material y tipo de cubierta.
- Material y tipo de fachada.
- Número de pisos


## 7.2 Tipos constructivos representativos


A continuación se presenta la descripción de los tipos constructivos representativos encontrados de acuerdo con los parámetros básicos de clasificación.


**Tabla 28**  
**Descripción de tipos constructivos representativos.**

<i><b>TIPO CONSTRUCTIVO</b></i>	<i><b>CÓD.</b></i>	<i><b>DESCRIPCIÓN</b></i>	<i><b>IMAGEN</b></i>
<i><b>MUROS DE MADERA</b></i>	<i><b>W</b></i>	<p>Es una tipología en la que predomina la madera como elemento estructural principal, están conformados un esqueleto en madera cubierto con láminas de madera, aunque en algunos casos pueden ser láminas de otro material. Las edificaciones de madera corresponden en general a edificaciones de uno o dos pisos con entrepiso de diafragma flexible conformado por vigas de madera o acero y losa en madera. La cubierta generalmente es una cubierta ligera conformada por vigas de acero o madera y lamina de zinc.</p> <p>Se encuentra principalmente en zonas suburbanas, barrios antiguos y asentamientos. En la actualidad se emplea muy rara vez.</p>	



<p><i>ADOBE.</i></p>	<p>A</p>	<p>Son edificaciones antiguas de máximo dos pisos, en las cuales la estructura principal está conformada por muros en bloques de arcilla cocidos al sol, unidos con barro, sin elementos de liga. La cubierta generalmente son vigas de madera apoyadas en largueros o directamente sobre los muros, sobre las cuales descansa una estructura en caña que sirve de apoyo a tejas de arcilla cocidas, en algunos casos pueden observarse cubiertas livianas en otros materiales. Para las edificaciones de dos pisos en la mayoría de los casos el entrepiso es madera y se comporta como diafragma flexible.</p> <p>En la actualidad la construcción con este tipo de material es muy limitada.</p>	
----------------------	----------	---	---

<i><b>TIPO CONSTRUCTIVO</b></i>	<i><b>CÓD.</b></i>	<i><b>DESCRIPCIÓN</b></i>	<i><b>IMAGEN</b></i>
<i><b>BAHAREQUE.</b></i>	<i><b>B</b></i>	<p>Es un sistema estructural de muros conformados por un esqueleto en madera o bambú cubierto con un revoque de mortero de barro que puede apoyarse en una esterilla de bambú o madera entrelazada con sogá y/o alambre. El espacio entre las esterillas se rellena con piedras, barro, residuos de teja o piedras en conjunto con un mortero a base de cal y lodo.</p> <p>Generalmente son estructuras de máximo 2 pisos con altura de entrepiso de aproximadamente 3.00m. Las cubiertas consisten en esterillas de madera o caña apoyadas en vigas de madera que soportan cubiertas livianas y/o tejas de barro.</p>	

<p><i>MAMPOSTERÍA SIMPLE</i></p>	<p><i>MS</i></p>	<p>Las edificaciones de mampostería simple están conformadas por muros en ladrillo, bloque de concreto, bloques de piedra que pueden estar colocados sin ningún material de unión, con mortero cementoso o de cualquier otro tipo de material. La mayoría de las edificaciones encontradas en este tipo constructivo son de 1 y 2 pisos con cubiertas ligeras conformadas por correas metálicas y tejas en lamina de zinc. También se pueden observar cubiertas en teja de barro y placas de concreto.</p> <p>Para las edificaciones de 2 pisos se observa en la mayoría de los casos diafragmas de entrepiso flexibles conformados por vigas en madera o metálicas con losa de entrepiso en madera.</p> <p>Se encuentra principalmente en zonas barrios antiguos y asentamientos. En la actualidad se emplea muy rara vez.</p>	
--------------------------------------	------------------	---	---

<i><b>TIPO CONSTRUCTIVO</b></i>	<i><b>CÓD.</b></i>	<i><b>DESCRIPCIÓN</b></i>	<i><b>IMAGEN</b></i>
<i><b>MAMPOSTERÍA CONFINADA</b></i>	<i><b>MC</b></i>	<p>La mampostería confinada consiste en muros de mampostería simple con elementos de concreto reforzado (columnas de amarre, vigas) en su perímetro construidos luego de la construcción de un muro de mampostería simple, a modo de refuerzo.</p> <p>La cubierta en la mayoría de los casos es una cubierta liviana pero también se observan cubiertas en placa de concreto. Las placas de entrepiso en la mayoría de los casos están conformadas por entrepisos flexibles de vigas de madera o acero y losa de madera.</p> <p>El comportamiento esperado de este sistema estructural puede variar según el tipo de diafragma y la disposición de elementos de confinamiento en concreto reforzado.</p>	



<p><i>MAMPOSTERÍA REFORZADA.</i></p>	<p><i>MR</i></p>	<p>Las edificaciones de mampostería reforzada están conformadas por muros en bloque de concreto o arcilla perforados con algunas celdas rellenas de concreto y con acero de refuerzo, generalmente son edificaciones de 1 o 2 pisos con cubierta ligera en la mayoría de los casos.</p> <p>Las edificaciones de 2 o más pisos presentan en la mayoría de los casos diafragmas de entrepiso rígidos conformados por vigas metálicas con losa en concreto. También se observan casos de diafragmas de entrepiso flexibles conformados por vigas en madera o metálicas con losa en madera.</p> <p>Es el sistema de mampostería más utilizado en la actualidad.</p>	
<p><i>MUROS EN CONCRETO PREFABRICADO</i></p>	<p><i>CP</i></p>	<p>Es un sistema de muros estructurales prefabricados en concreto sobre los cuales se apoyan placas prefabricadas también de concreto.</p> <p>Se encuentran estructuras de 1 o 2 niveles con cubiertas ligeras. En estructuras de 2 niveles el diafragma de entrepiso se idealiza como diafragma flexible.</p>	

<i><b>TIPO CONSTRUCTIVO</b></i>	<i><b>CÓD.</b></i>	<i><b>DESCRIPCIÓN</b></i>	<i><b>IMAGEN</b></i>
<i><b>PÓRTICOS DE ACERO ARRIOSTRADOS</b></i>	<i><b>PAR</b></i>	Estructuras cuyo sistema estructural principal es a base de pórticos de acero conformados por vigas, columnas y arriostramiento. En algunos casos estos pórticos se rellenan con muros de concreto o de mampostería a manera de elementos de cerramiento.	
<i><b>PÓRTICOS EN CONCRETO RESISTENTES A MOMENTO</b></i>	<i><b>PCR</b></i>	<p>Este sistema estructural está conformado por vigas y columnas en concreto unidas monolíticamente. Se pueden observar en edificaciones de uno o más pisos, en cuyo caso las placas de entrepiso son en concreto y las cubiertas que pueden ser ligeras, pesadas o losas de concreto.</p> <p>El comportamiento de las construcciones de pórticos de concreto reforzado se caracteriza por la flexibilidad asociada a la disposición de los elementos que la conforman sin tener algún tipo de contravientos o riostras.</p>	

La Tabla 29 resume los tipos constructivos característicos y la referencia de cada uno de ellos.

**Tabla 29**  
**Tipos constructivos característicos**

<b>ID TIPO</b>	<b>CARACTERÍSTICAS</b>
A-SPSB-1	Adobe - Sin Diafragma, Cubierta Pesada, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 1
B-SLFB-1	Bahareque - Sin Diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Bajos - 1
CP-FLSB-2	Muros en Concreto prefabricado - Flexible, Cubierta Ligera, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 2
MC-RCSM-4	Mampostería confinada - Rígido, Cubierta en concreto, Fachada Frágil sin dilatar, Medios - 4
MC-RCSM-5	Mampostería confinada - Rígido, Cubierta en concreto, Fachada Frágil sin dilatar, Medios - 5
MC-RLSB-2	Mampostería confinada - Rígido, Cubierta Ligera, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 2
MR-RCSB-2	Mampostería reforzada - Rígido, Cubierta en concreto, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 2
MR-RLSB-2	Mampostería reforzada - Rígido, Cubierta Ligera, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 2
MR-SLSB-1	Mampostería reforzada - Sin Diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 1
MS-SLSB-1	Mampostería Simple - Sin Diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Frágil sin dilatar, Bajos - 1
PAA-SLSB-B	Pórticos en acero arriostrados - Sin Diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Frágil sin dilatar, Bodega – B
PCR-RCSM-5	Pórticos en concreto RM - Rígido, Cubierta en concreto, Fachada Frágil sin dilatar, Medios - 5
W-SLFB-1	Muros en madera - Sin Diafragma, Cubierta Ligera, Fachada Flexible, Bajos - 1

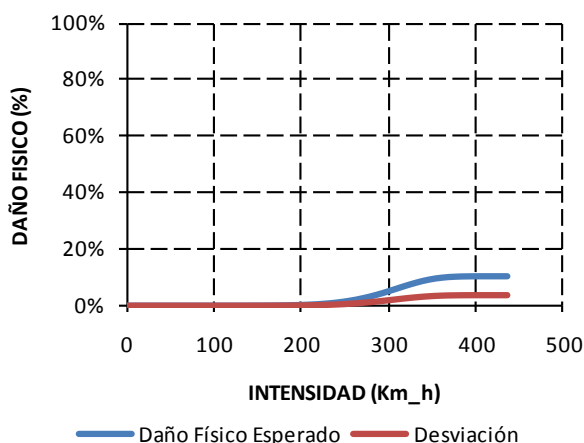
### 7.3 Funciones de vulnerabilidad

Cada uno de los sistemas anteriores se caracteriza desde el punto de vista de las variables que afectan la asignación de vulnerabilidad ante la velocidad de viento, particularmente el tipo de cubierta y de fachada predominantes. En la Figura 118 a Figura 130 presentan las funciones de vulnerabilidad asignadas.

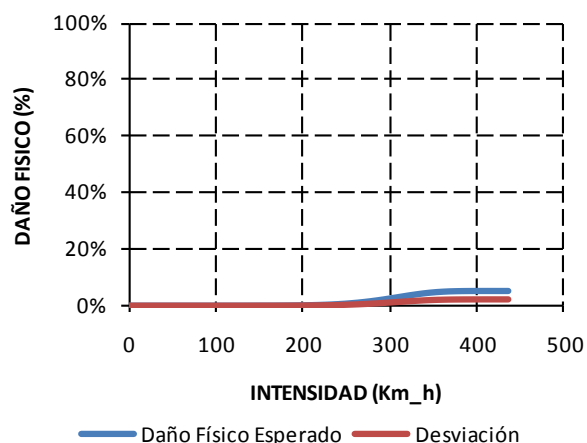
**Tabla 30**  
**Parámetros de viento para cada tipo constructivo.**

<b>TIPO ESTRUCTURAL</b>	<b>ID</b>	<b>DESCRIPCION</b>	<b>INTENSIDAD DE DAÑO MEDIO</b>	<b>DESVIACION</b>	<b>DAÑO FISICO MAX</b>
A-SPSB-1	PS1	Cubierta ligera, Fachada en mampostería	300	8.1	20
B-SLFB-1	LF1	Cubiertaligera, Fachada flexible	180	7.4	60

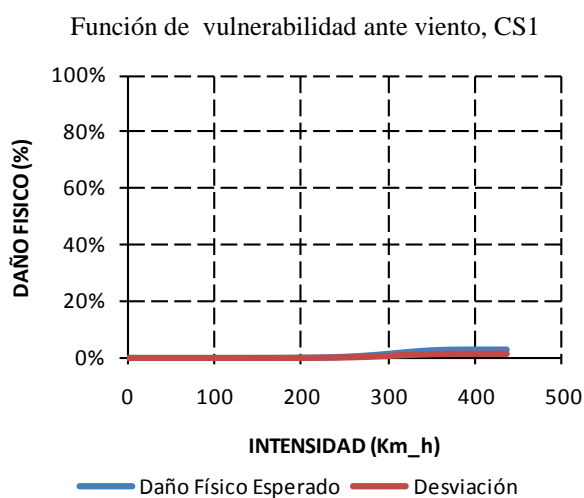
CP-FLSB-2	LS2	Cubierta ligera, Fachada en mampostería	300	8.1	20
MC-RCSM-4	CS4	Cubierta en concreto, Fachada en mampostería	300	8.1	3
MC-RCSM-5	CS5	Cubierta en concreto, Fachada en mampostería	300	8.1	2
MC-RLSB-2	LS2	Cubierta ligera, Fachada en mampostería	300	8.1	20
MR-RCSB-2	CS2	Cubierta en concreto, Fachada en mampostería	300	8.1	5
MR-RLSB-2	LS2	Cubierta ligera, Fachada en mampostería	300	8.1	20
MR-SLSB-1	LS1	Cubierta ligera, Fachada en mampostería	300	8.1	40
MS-SLSB-1	LS1	Cubierta ligera, Fachada en mampostería	300	8.1	40
PAA-SLSB-B	LS1	Cubierta ligera, Fachada en mampostería	300	8.1	40
PCR-RCSM-5	CS5	Cubierta en concreto, Fachada en mampostería	300	8.1	2
W-SLFB-1	LF1	Cubiertaligera, Fachada flexible	180	7.4	60



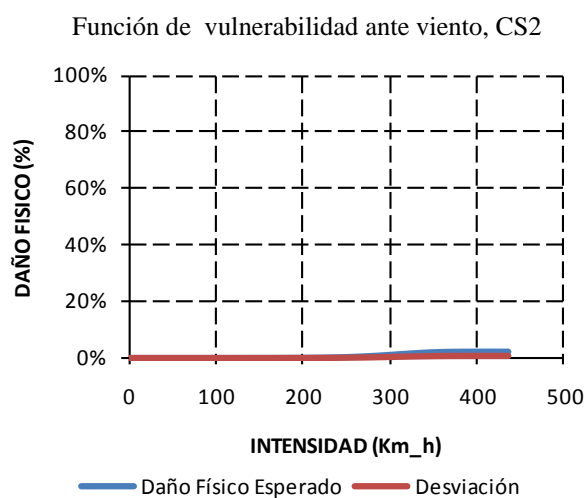
**Figura 118**



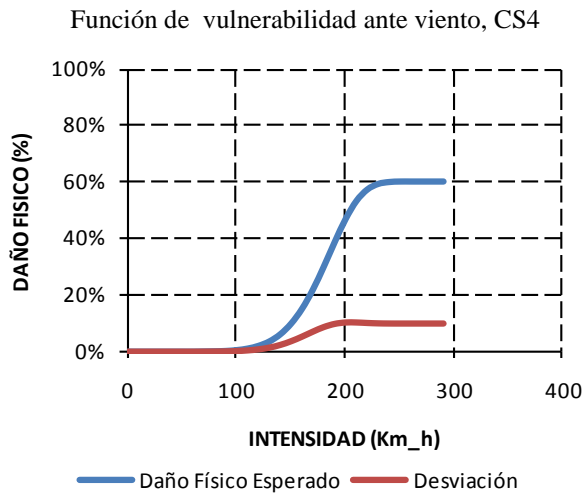
**Figura 119**



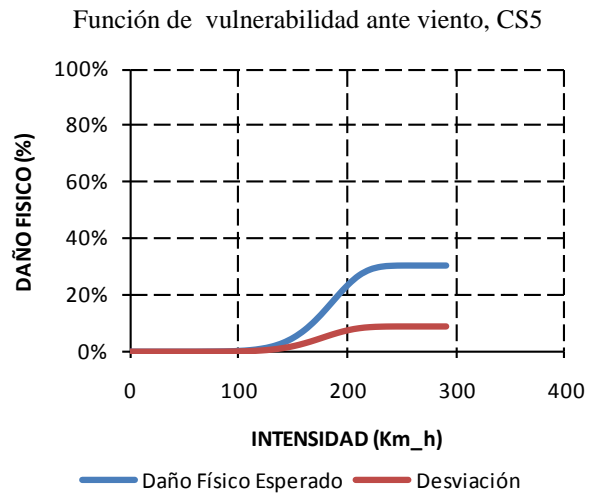
**Figura 120**



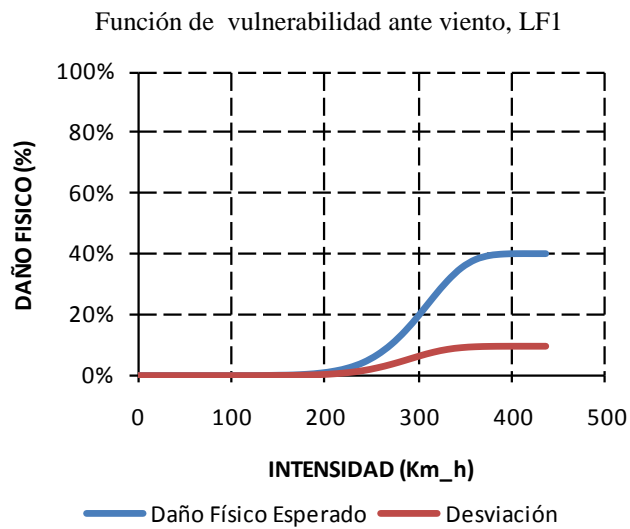
**Figura 121**



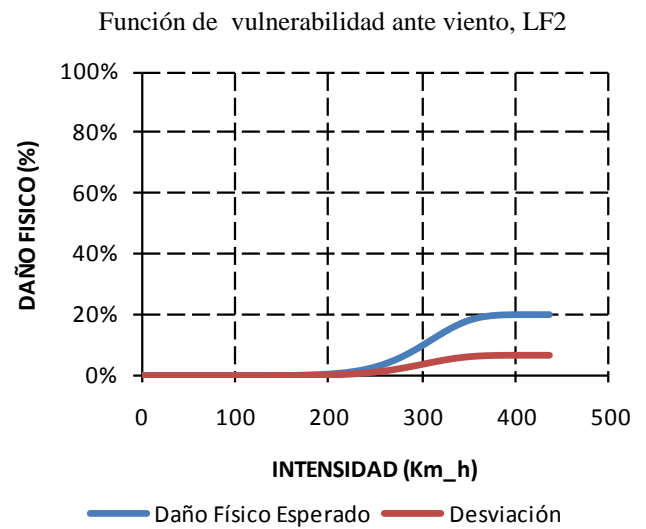
**Figura 122**



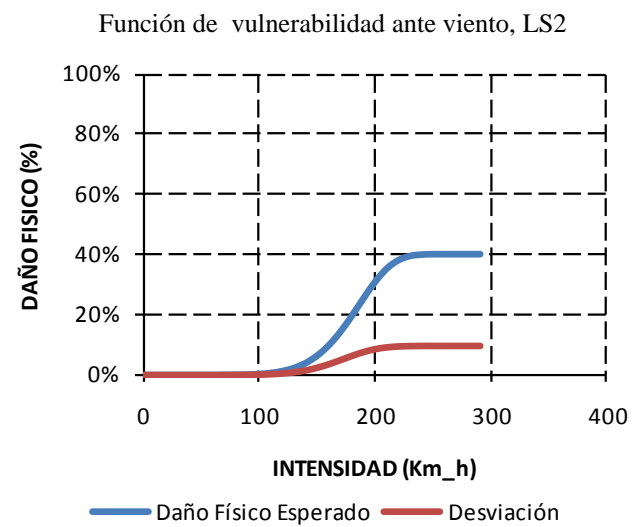
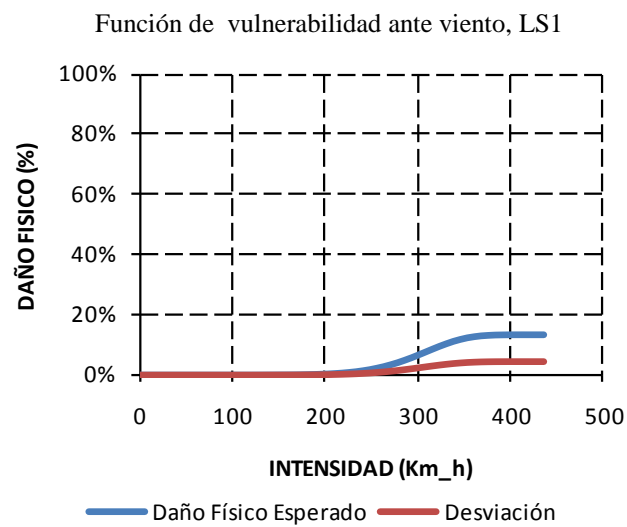
**Figura 123**



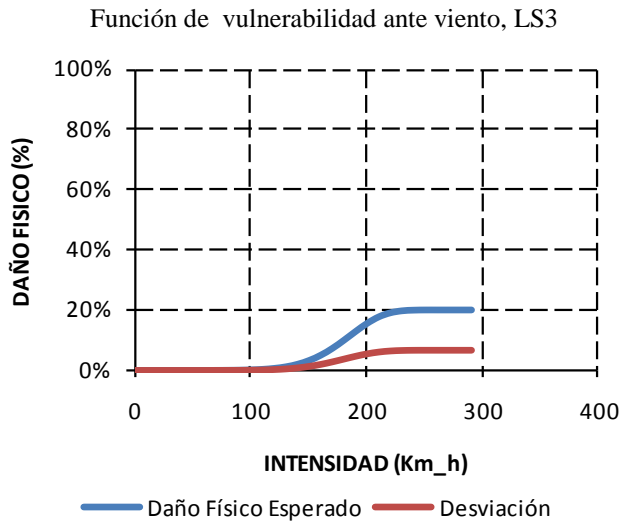
**Figura 124**



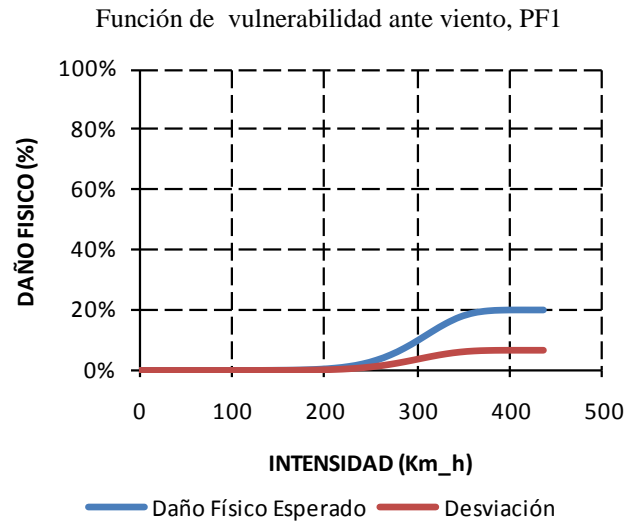
**Figura 125**



**Figura 126**

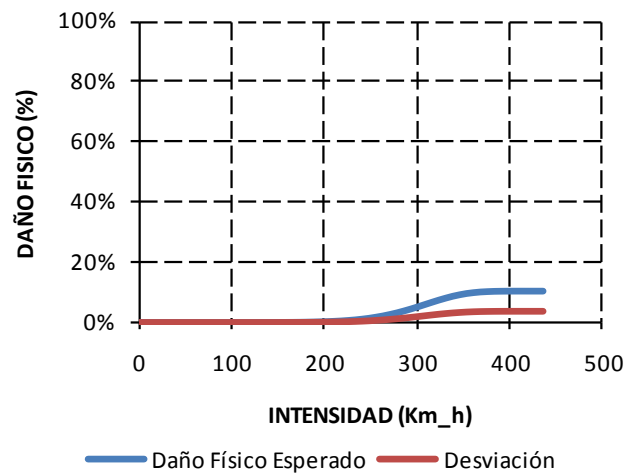


**Figura 127**



**Figura 128**

Función de vulnerabilidad ante viento, PF2

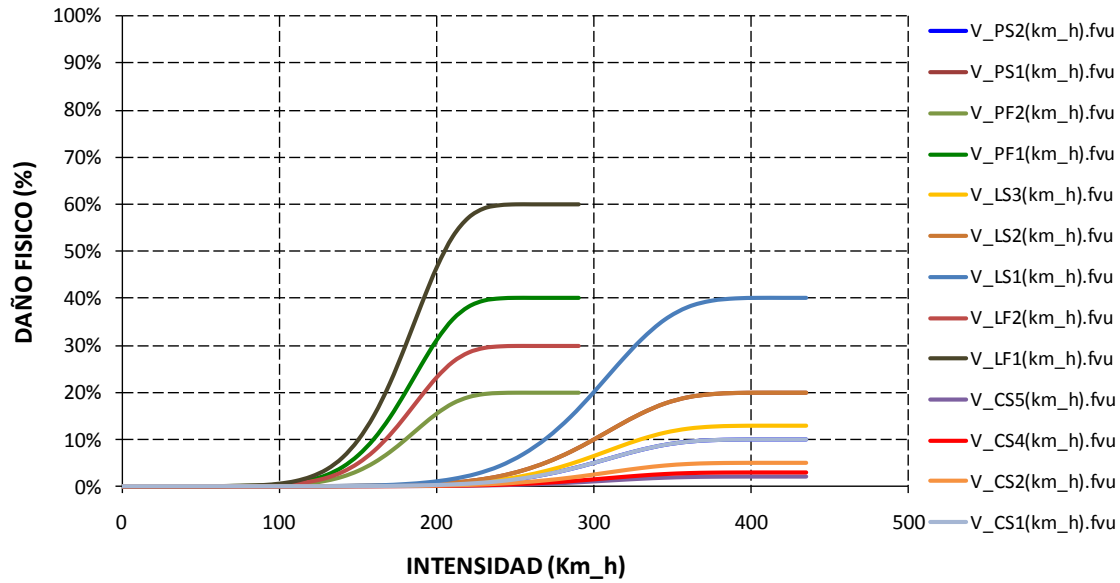


**Figura 129**

Función de vulnerabilidad ante viento, PS1

**Figura 130** Función de vulnerabilidad ante viento, PS2

En la Figura 131 se presentan todas las funciones para viento consideradas en una misma gráfica para efectos comparativos.



**Figura 131**

Funciones de vulnerabilidad ante viento

Las bases de datos de exposición presentadas y las funciones de vulnerabilidad asignadas a los tipos constructivos predominantes en cada una de las ciudades conforman la información básica, junto con la amenaza por vientos huracanados, para realizar los análisis de riesgo de desastre.

## 8. PERFIL DE RIESGO CATASTRÓFICO POR HURACÁN SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO

Con base en el cálculo probabilista de la amenaza y en el inventario y valoración de activos expuestos con sus funciones de vulnerabilidad, se desarrolló una modelación probabilista del riesgo para el país por vientos huracanados usando la plataforma CAPRA-GIS (ERN-AL 2010). La metodología de cálculo del riesgo se presenta en el Anexo 3.

### 8.1 Pérdidas totales a nivel de país

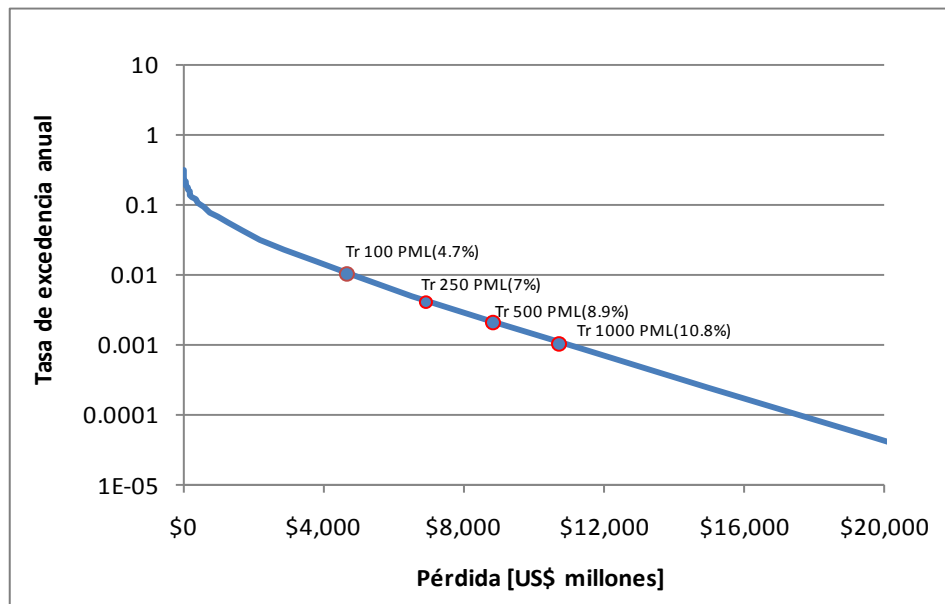
En primer lugar se presenta la Tabla 31 con la información consolidada a nivel de todo el país como es el valor total expuesto, los valores de pérdida anual esperada en valor y al millar (también conocida como prima técnica de riesgo) y valores indicativos de pérdida máxima probable para diferentes períodos de retorno.

**Tabla 31**  
**Resultados generales de PML para viento huracanado sin incluir el cambio climático**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	\$99,017
Pérdida Anual	US\$ x10 <sup>6</sup>	\$231
Esperada	%	2.3
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50	\$3,069	3.1%
100	\$4,644	4.7%
250	\$6,907	7.0%
500	\$8,820	8.9%
1000	\$10,711	10.8%



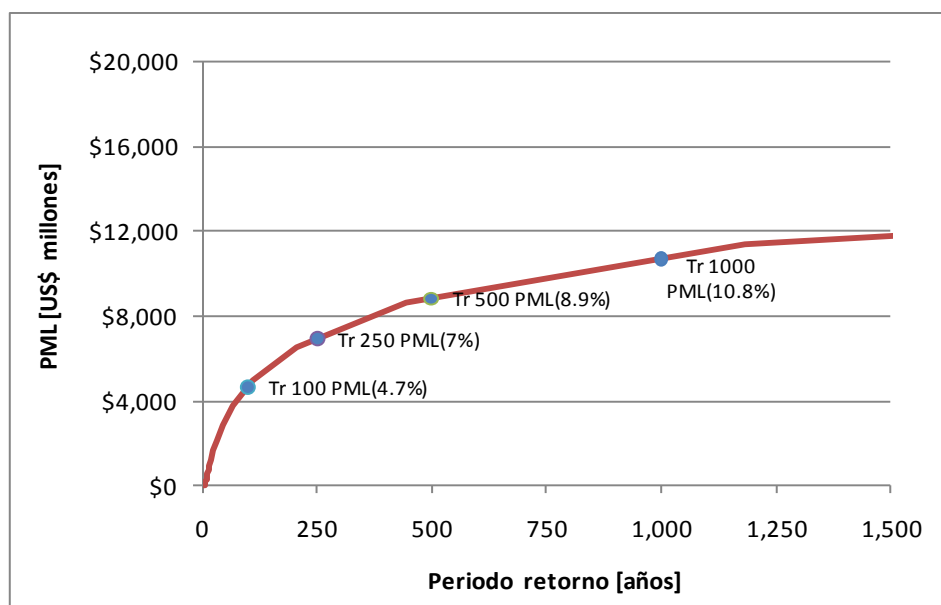
La Figura 132 presenta las curvas de excedencia de pérdidas a nivel país por viento huracanado cuando no se tiene en cuenta el efecto del cambio climático.



**Figura 132**

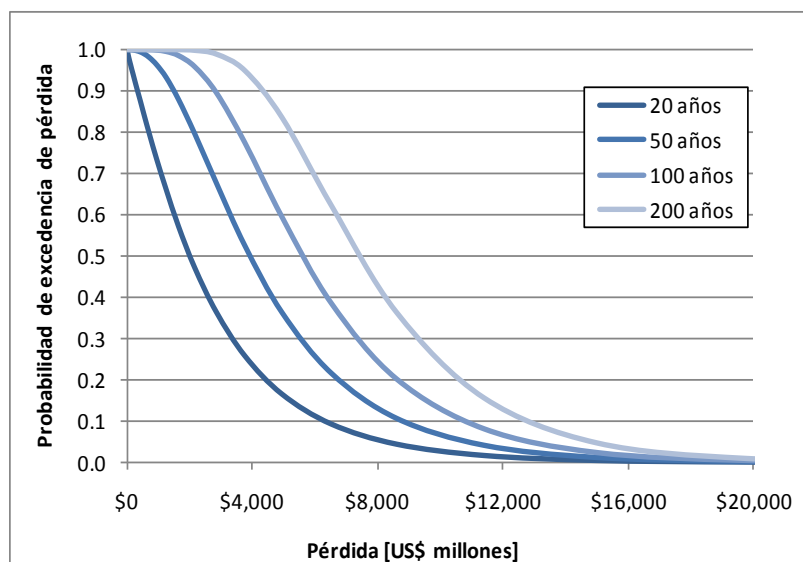
Excedencia de pérdidas por viento huracanado sin cambio climático

La Figura 133 presenta la curva de pérdida máxima probable en valor y en porcentaje para diferentes periodos de retorno. Paralelamente se presentan en la Figura 134 las curvas de probabilidad de excedencia de diferentes valores de PML en % para diferentes períodos de exposición, en particular 20, 50, 100 y 200 años.



**Figura 133**

Curva de PML por vientos huracanados sin cambio climático



**Figura 134**

Curvas de probabilidad de excedencia de diferentes valores de PML, para diferentes tiempos de exposición por vientos huracanados sin cambio climático

La Tabla 32 resume por su parte el grupo de simulaciones (“familia”) de los escenarios críticos resultantes del análisis, es decir los escenarios que resultaron con las mayores pérdidas

económicas esperadas por efecto de vientos huracanados cuando no se incluye el impacto del cambio climático.

**Tabla 32**

**Grupo de simulaciones de los escenarios críticos de análisis para vientos huracanados**

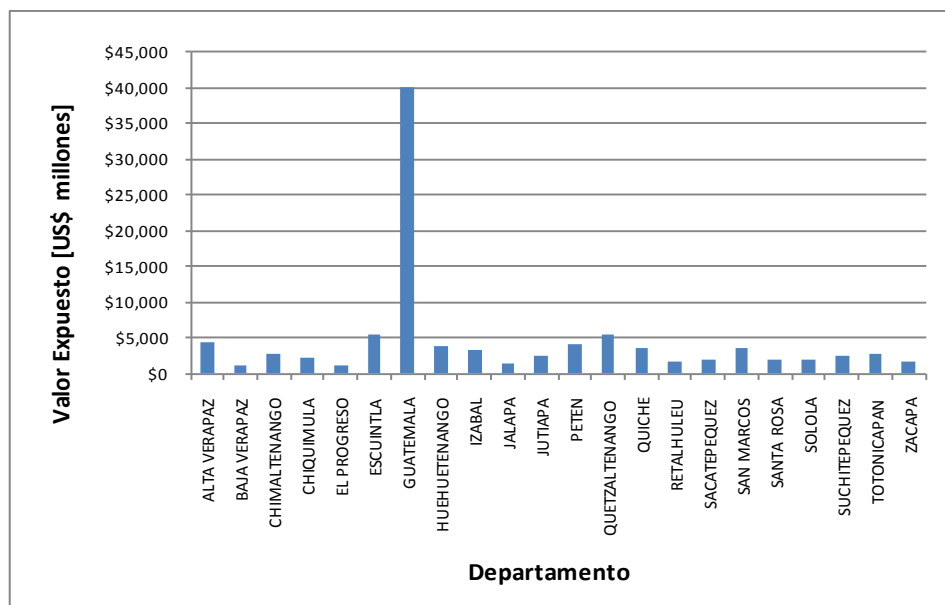
N°	Escenario	Pérdida	
		[US\$ x 10 <sup>6</sup> ]	%
27	IRIS	1,937.60	1.96%
18	FIFI	1,758.67	1.78%
35	MITCH	1,616.43	1.63%
24	Hattie	1,580.06	1.60%
20	FRANCELIA	1,514.84	1.53%
66	NOTNAMED	1,433.72	1.45%
23	GRETA	1,301.90	1.31%
49	NOTNAMED	1,265.77	1.28%
44	NOTNAMED	1,248.51	1.26%
69	NOTNAMED	1,247.41	1.26%

## 8.2 CONCENTRACIÓN DEL RIESGO POR HURACANES

El análisis de concentración del riesgo se realiza a nivel de departamentos y a nivel de los diferentes sectores de uso, para los sectores público y privado, así como para los principales componentes de infraestructura a nivel nacional.

### 8.2.1 Comparación de pérdidas por departamento

Las pérdidas se evalúan por departamento como unidad geográfica de análisis. La Figura 135 presenta la comparación de valores totales expuestos por departamento incluyendo las construcciones, la infraestructura urbana y la infraestructura nacional.



**Figura 135**

Valores expuestos por departamentos

Para cada uno de los departamentos, se realiza en forma complementaria un análisis individual, que permite estimar el nivel de pérdida máxima probable y el nivel de primas individuales por departamento. La Figura 136 presenta un ejemplo del formato de presentación de los resultados individuales para cada uno de los departamentos. En el Anexo 4 se presentan los resultados individuales para los departamentos restantes. En cada caso se presentan resultados correspondientes a:

- Tabla resumen de pérdida anual esperada (AAL) y pérdida máxima probable (PML)
- Curvas de tasas de excedencia de pérdidas y de PML con el período de retorno
- Diagrama de barras con los valores de AAL en valor y en millar discriminados para cada uno de los sectores de uso.

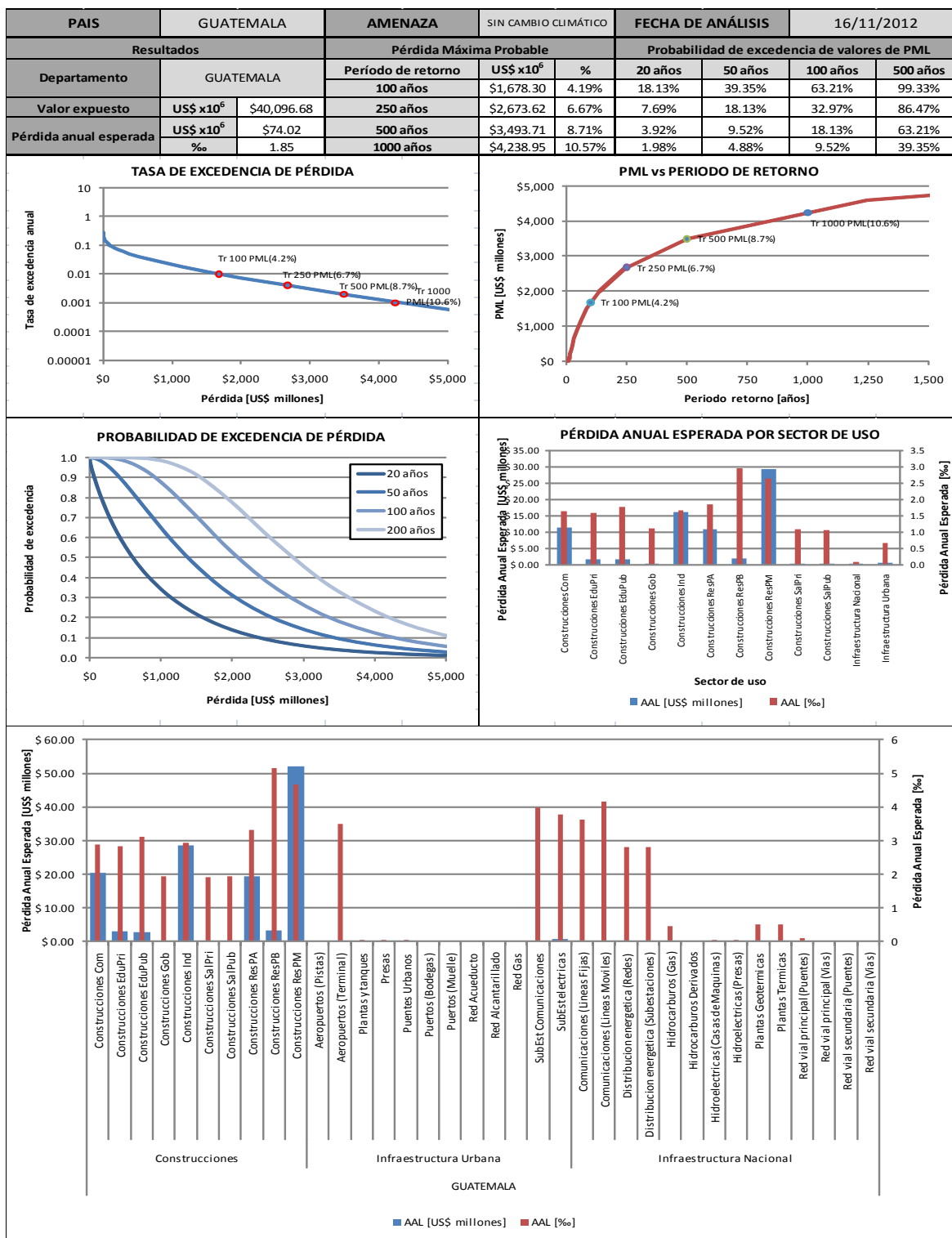


Figura 136

Ejemplo de resultados por viento sin cambio climático para Guatemala

La Figura 137 resume los valores de PML para periodos de retorno de 250, 500 y 1000 años para cada uno de los departamentos tanto en valor como en porcentaje.

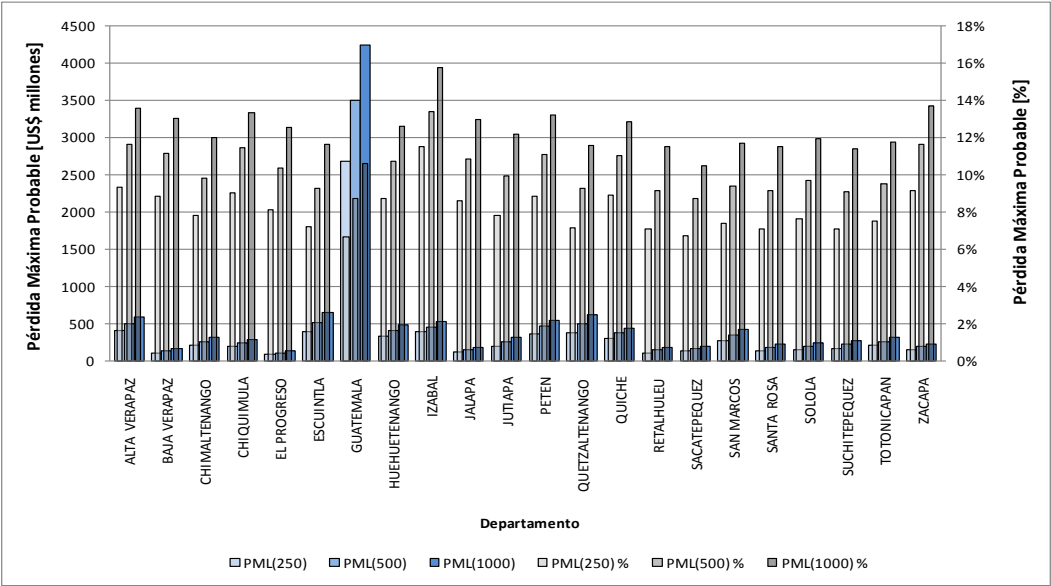


Figura 137

Valores de PML por viento sin cambio climático y para varios periodos de retorno en cada departamento

Por otro lado la Figura 138 presenta los valores correspondientes de AAL en cada departamento tanto en valor como al millar.

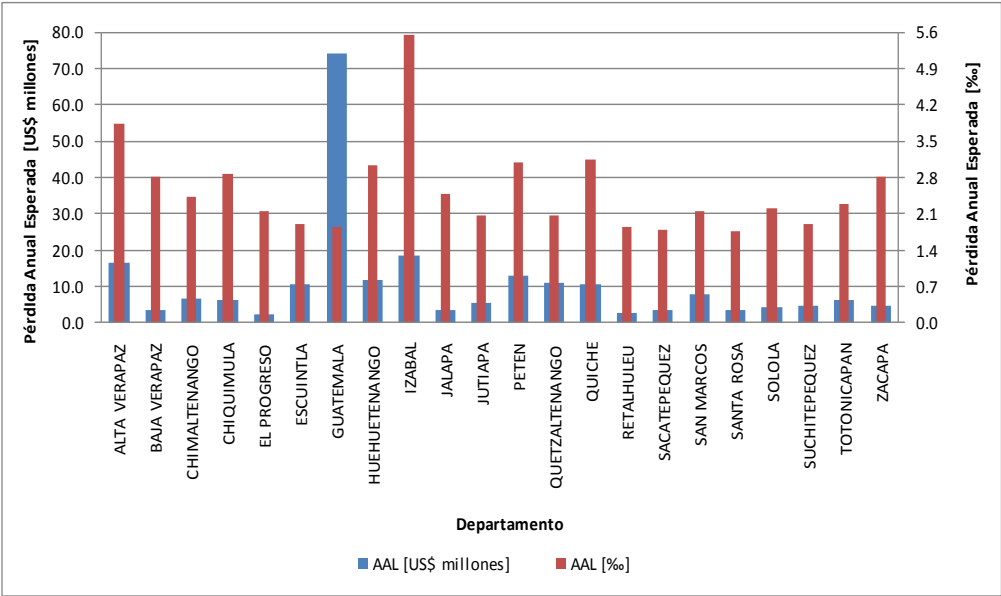
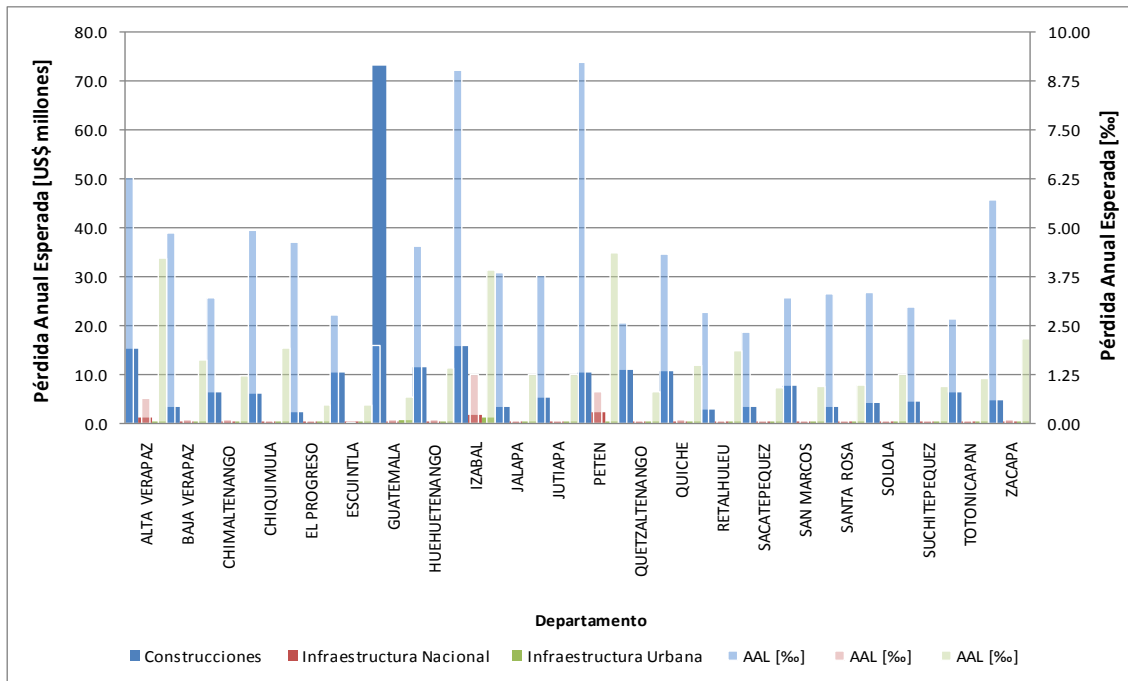


Figura 138

Valores de AAL por viento sin cambio climático por departamento

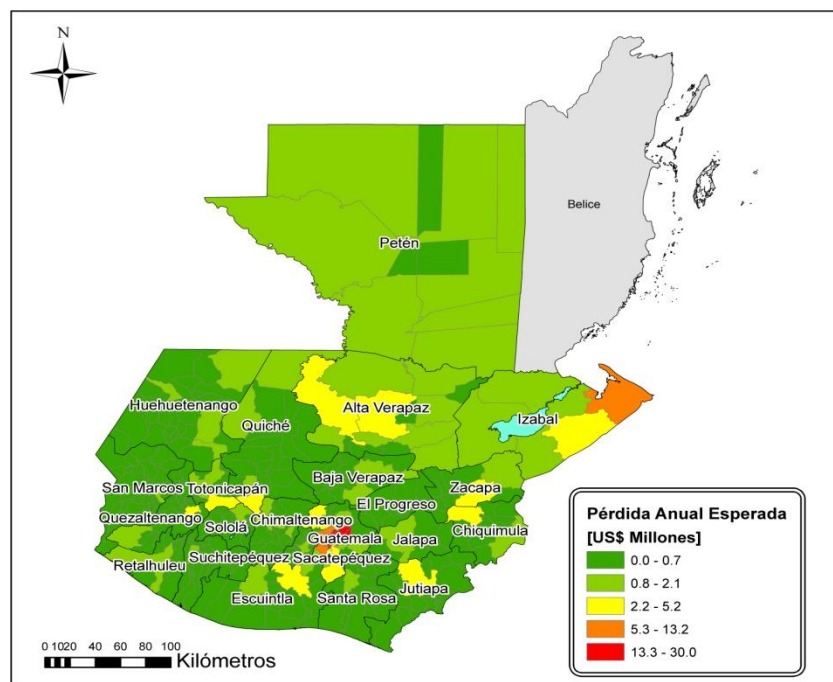
En la Figura 139 se presenta el desglose de las pérdidas anuales esperadas por sectores para cada uno de los departamentos. Los sectores considerados son las construcciones urbanas, la infraestructura urbana y la infraestructura nacional asociada con cada departamento.



**Figura 139**

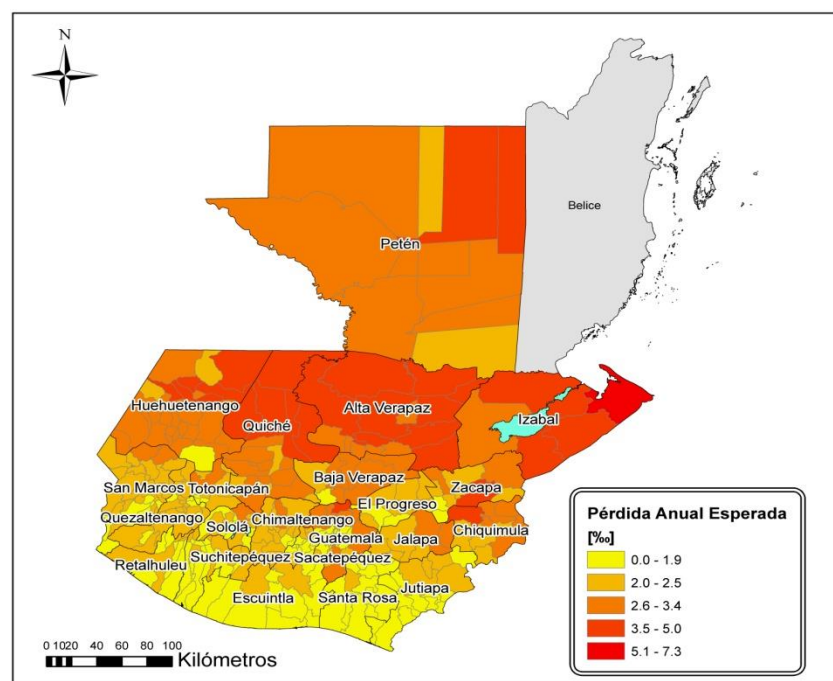
Valores de AAL por viento sin cambio climático por departamento desglosada por sectores

Finalmente la Figura 140 y la Figura 141 presentan la distribución geográfica de la pérdida anual esperada en valor y al millar para cada uno de los municipios. Por otro lado la Figura 142 y la Figura 143 presentan la pérdida máxima probable en valor y en porcentaje para cada uno de los departamentos.



**Figura 140**

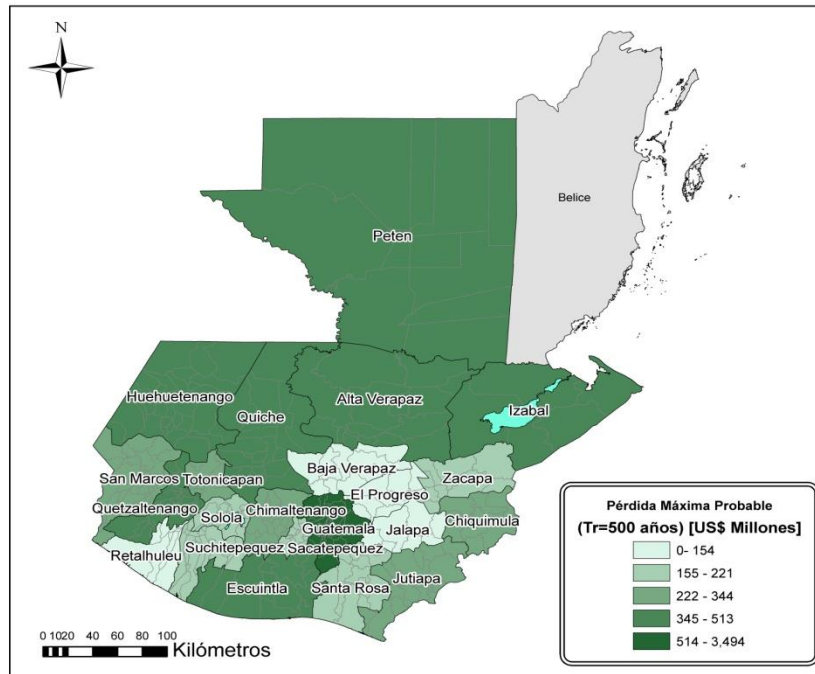
Distribución geográfica de AAL (valor) por viento y por municipio



**Figura 141**

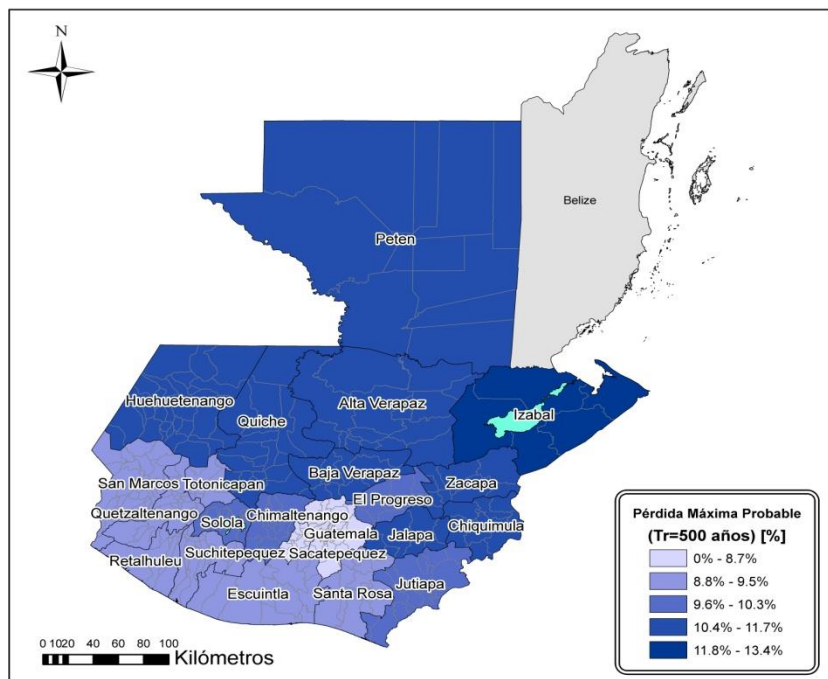
Distribución geográfica de AAL (%) por viento y por municipio





**Figura 142**

Distribución geográfica de PML (valor) por viento y por departamento

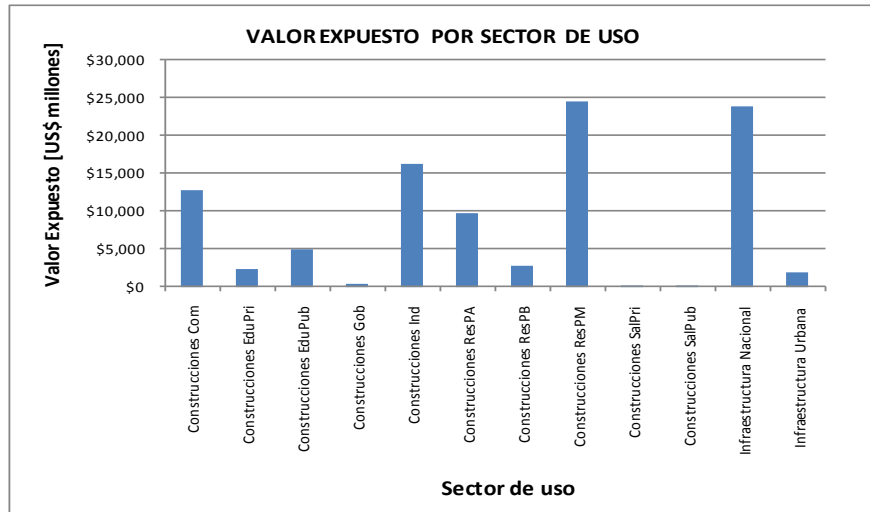


**Figura 143**

Distribución geográfica de PML (%) por viento y por departamento

### 8.2.2 Comparación de pérdidas por sector

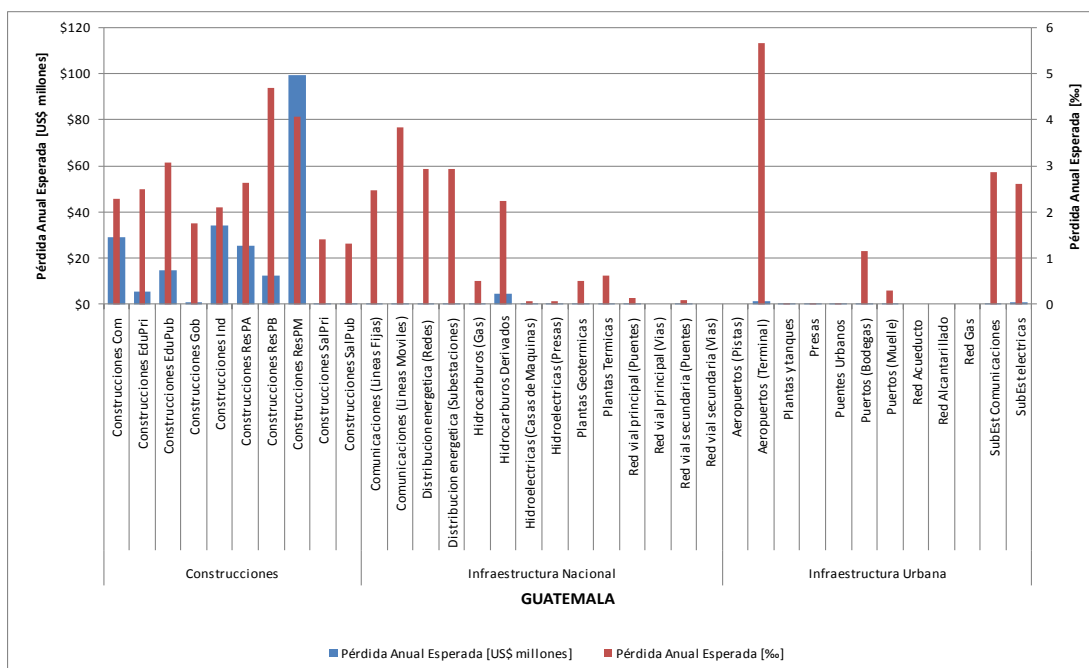
La Figura 144 presenta la comparación de los valores expuestos por sector a nivel del país.



**Figura 144**

Valores expuestos por sectores

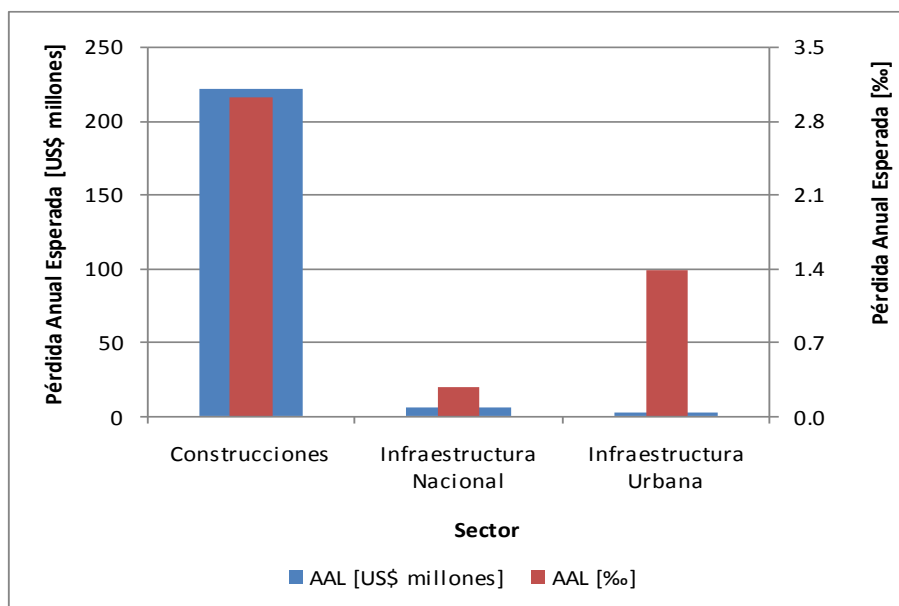
La Figura 145 totaliza la pérdida anual esperada en valor y al millar para cada uno de los sectores de uso a nivel país..



**Figura 145**

Valores de AAL por viento sin cambio climático y sectores

Por otro lado y en forma más resumida, la Figura 146 presenta los resultados equivalentes a la totalización de los resultados para los tres sectores de uso principales que corresponden a construcciones urbanas, infraestructura urbana e infraestructura nacional.



**Figura 146**

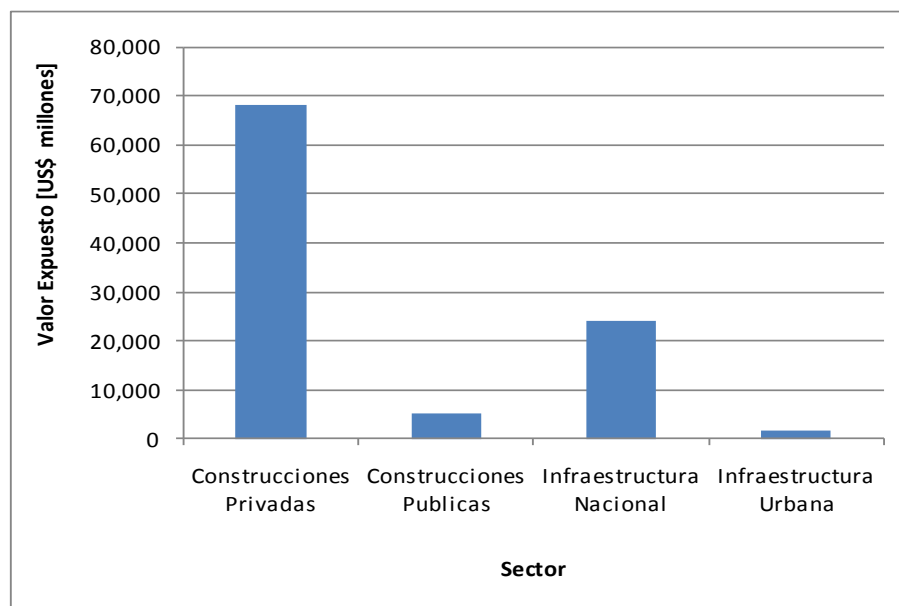
Resumen de distribución de valores de AAL por viento y por sectores

### 8.2.3 Pérdida máxima probable para sectores público y privado

Para evaluar la pérdida máxima probable para los sectores público y privado es necesario realizar análisis para cada uno de los portafolios que se desee analizar, ya que los resultados de este tipo de análisis dependen de la distribución geográfica relativa de los valores expuestos.

El sector público incluye las construcciones urbanas públicas (salud, educación –cuando son del Estado– y gubernamentales) así como toda la infraestructura. Por su parte el sector privado incluye únicamente las construcciones residenciales, comerciales, industriales y las construcciones respectivas del sector salud y educación.

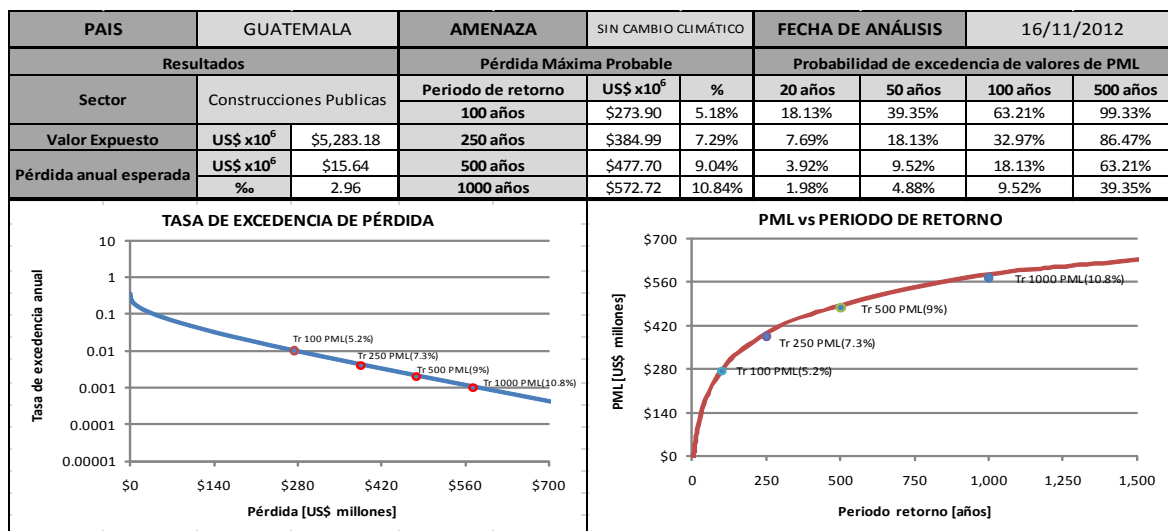
La Figura 147 presenta los valores expuestos a nivel de sector público y privado en el país.



**Figura 147**

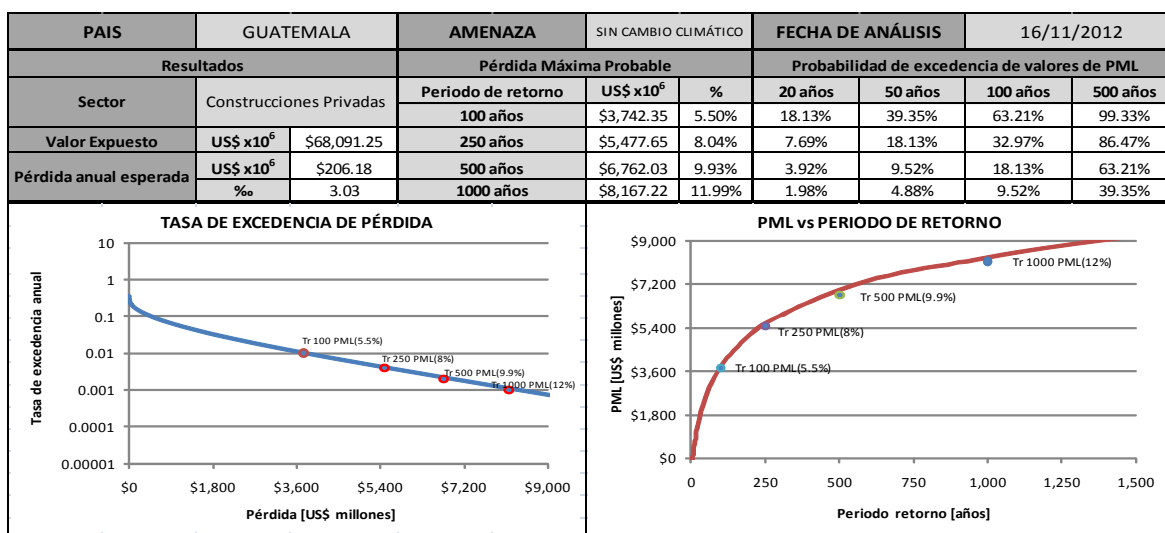
Valores expuestos por sectores

La Figura 148 y Figura 149 presentan la curva de PML para cada uno de estos sectores.



**Figura 148**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento para construcciones públicas



**Figura 149**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento para construcciones privadas

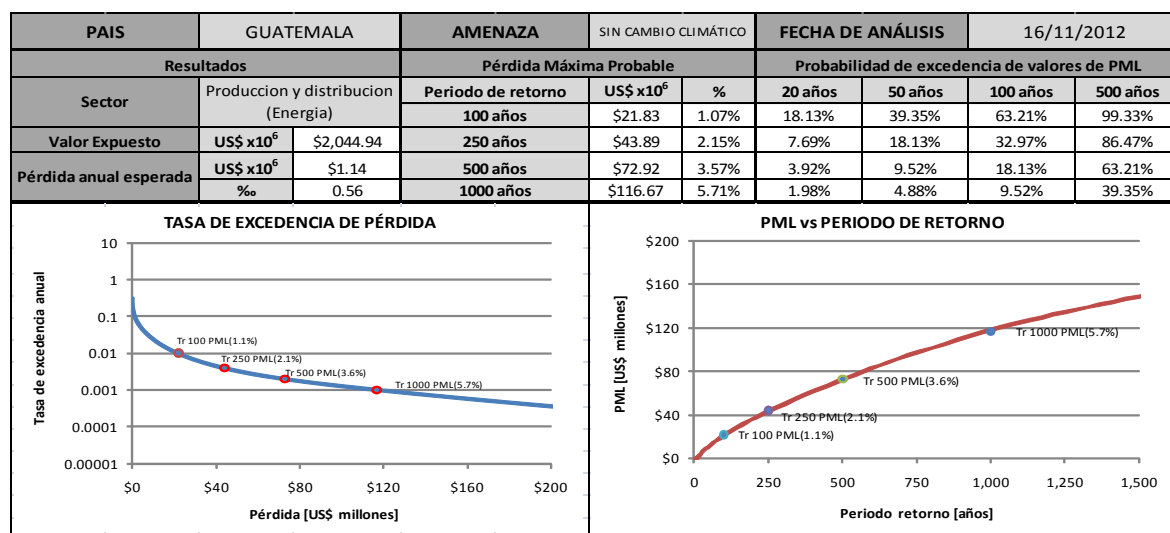
## 8.2.4 Pérdida máxima probable para la infraestructura nacional

Un análisis similar al anterior se realiza para el sector de infraestructura nacional teniendo en cuenta los siguientes análisis:

- Generación y distribución de energía

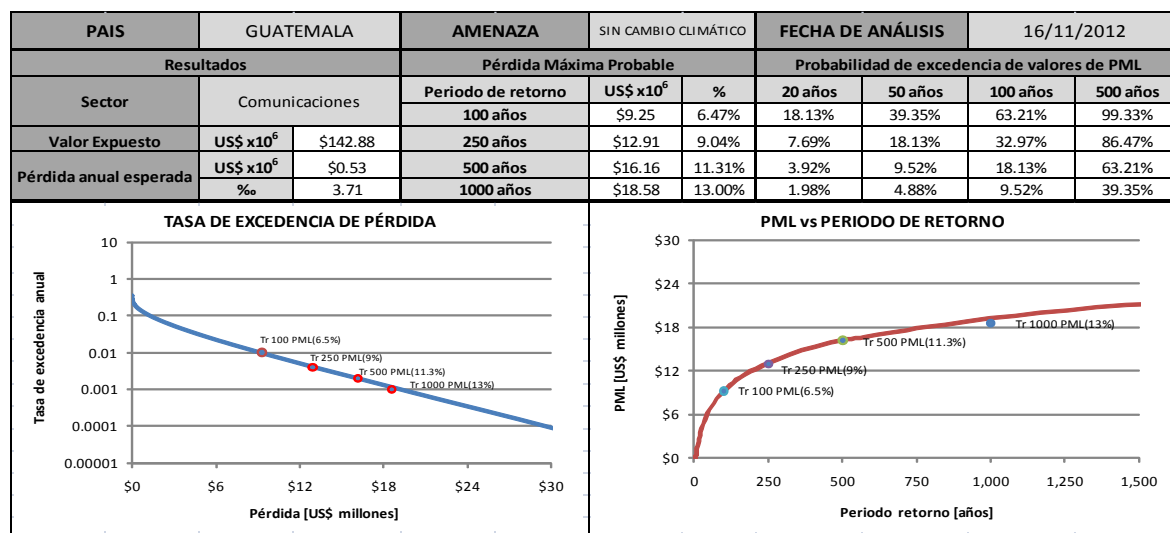
- Comunicaciones
- Hidrocarburos

Para cada uno de estos sectores se presentan los resultados de curvas de PML vs. periodo de retorno y valores globales de AAL en valor y en millares. De la Figura 150 a la Figura 152 se resumen estos resultados. En el Anexo 4 se presentan los resultados para los demás sectores.



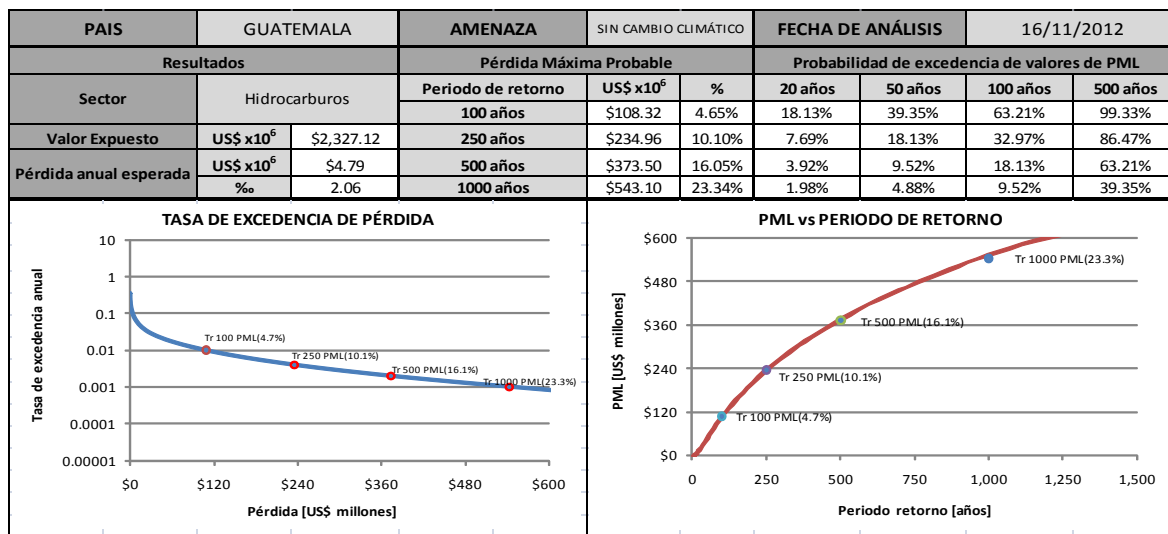
**Figura 150**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento para sector energía



**Figura 151**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento para sector comunicaciones



**Figura 152**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento para sector de hidrocarburos

## 9. PERFIL DE RIESGO CATASTRÓFICO POR HURACÁN CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO

Con base en el cálculo probabilista de la amenaza y en el inventario y valoración de activos expuestos con sus funciones de vulnerabilidad, se desarrolló una modelación probabilista del riesgo para el país por vientos huracanados usando la plataforma CAPRA-GIS (ERN-AL 2010). La metodología de cálculo del riesgo se presenta en el Anexo 5. En este caso se incorpora en la amenaza el efecto del cambio climático, de acuerdo con lo presentado en el informe de amenazas (en un documento independiente).

### 9.1 Pérdidas totales a nivel de país

En primer lugar se presenta la Tabla 33 con la información consolidada a nivel de todo el país como es el valor total expuesto, los valores de pérdida anual esperada en valor y al millar (también conocida como prima técnica de riesgo) y valores indicativos de pérdida máxima probable para diferentes períodos de retorno.

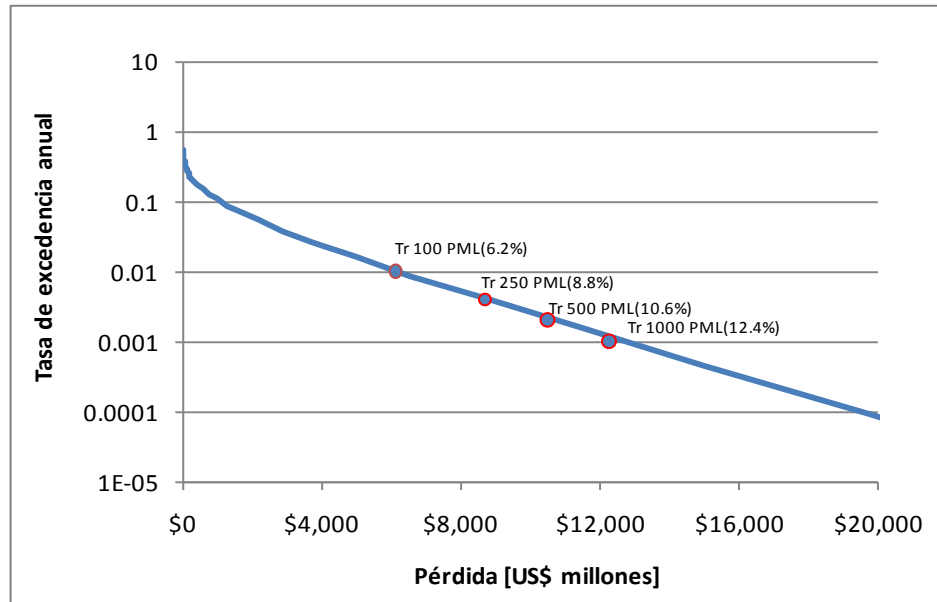
**Tabla 33**

**Resultados generales de PML para viento huracanado incluyendo el impacto asociado al cambio climático**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	\$99,017
Pérdida Anual	US\$ x10 <sup>6</sup>	\$393
Esperada	‰	4.0
PML		
Periodo retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50	\$4,338	4.4%
100	\$6,114	6.2%
250	\$8,680	8.8%
500	\$10,493	10.6%
1000	\$12,277	12.4%



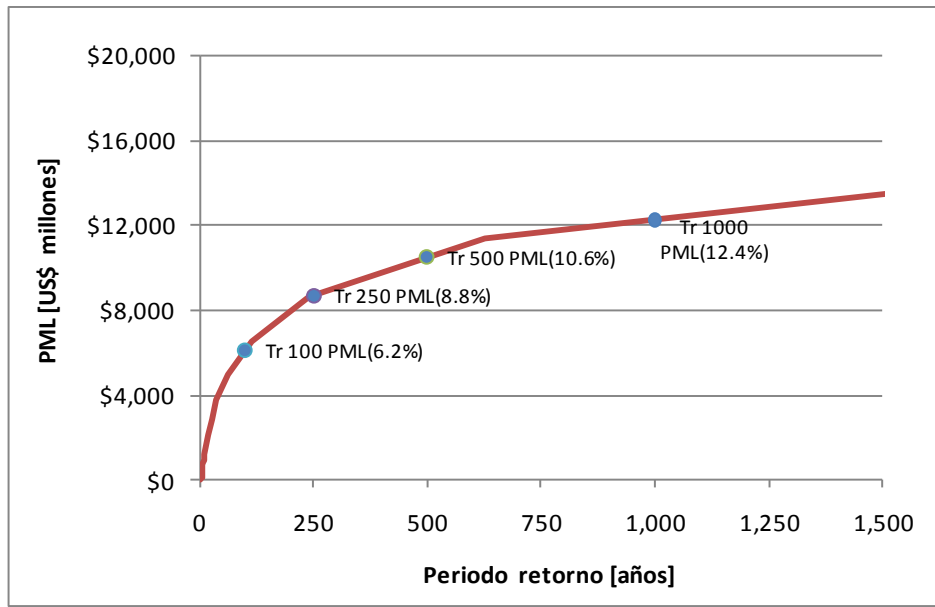
La Figura 153 presenta las curvas de excedencia de pérdidas a nivel país por viento huracanado cuando se tiene en cuenta el efecto del cambio climático.



**Figura 153**

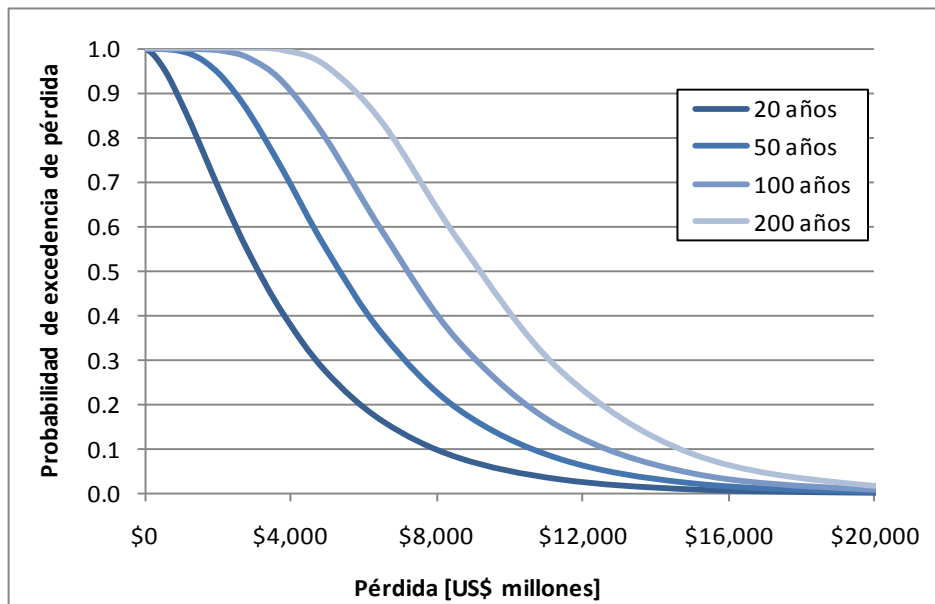
Excedencia de pérdidas por viento huracanado con cambio climático

La Figura 154 presenta la curva de pérdida máxima probable en valor y en porcentaje para diferentes periodos de retorno. Paralelamente se presentan en la Figura 155 las curvas de probabilidad de excedencia de diferentes valores de PML en % para diferentes períodos de exposición, en particular 20, 50, 100 y 200 años.



**Figura 154**

Curva de PML por viento huracanado con cambio climático



**Figura 155**

Curvas de probabilidad de excedencia de diferentes valores de PML, para diferentes tiempos de exposición por vientos huracanados con cambio climático

La Tabla 34 resume por su parte el grupo de simulaciones (“familia”) de los escenarios críticos resultantes del análisis, es decir los escenarios que resultaron con las mayores pérdidas económicas esperadas por efecto de vientos huracanados.

**Tabla 34**

**Grupo de simulaciones de los escenarios críticos de análisis para vientos huracanados**

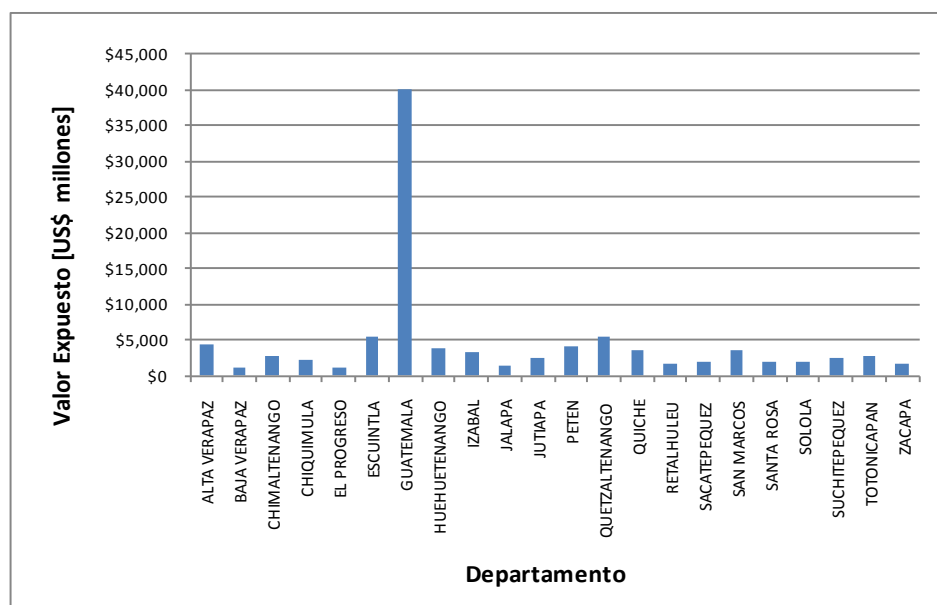
N°	Escenario	Pérdida	
		[US\$ x 10 <sup>6</sup> ]	%
116	Iris_P	2,702.33	2.73%
290	StormNo14	2,543.84	2.57%
144	Keith_P	2,263.53	2.29%
173	Notnamed_P	2,126.95	2.15%
115	IRIS	2,039.46	2.06%
157	MITCH	1,971.99	1.99%
127	Janet_P	1,846.43	1.86%
73	FIFI	1,829.58	1.85%
203	Notnamed_P	1,739.61	1.76%
263	Richard_P	1,713.21	1.73%

## 9.2 CONCENTRACIÓN DEL RIESGO POR HURACANES

El análisis de concentración del riesgo se realiza a nivel de departamentos y a nivel de los diferentes sectores de uso, para los sectores público y privado, así como para los principales componentes de infraestructura a nivel nacional.

### 9.2.1 Comparación de pérdidas por departamento

Las pérdidas se evalúan por departamento como unidad geográfica de análisis. La Figura 156 presenta la comparación de valores expuestos por departamento.

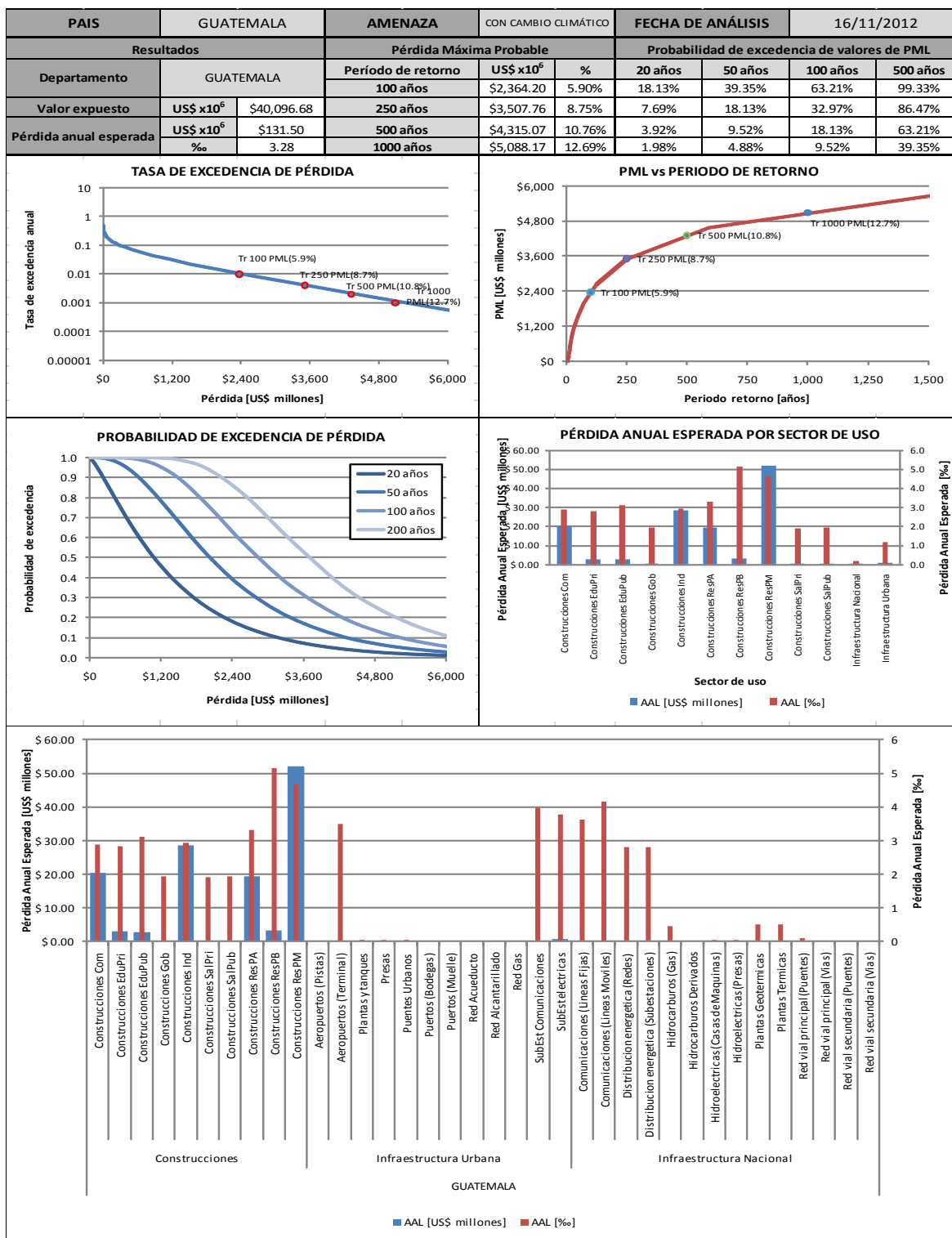


**Figura 156**

Valores expuestos por departamentos

Para cada uno de los departamentos, se realiza en forma complementaria un análisis individual, que permite estimar el nivel de pérdida máxima probable y el nivel de primas individuales por departamento. La Figura 157 presenta un ejemplo del formato de presentación de los resultados individuales para cada uno de los departamentos. En el Anexo 5 se presentan los resultados individuales para los departamentos restantes. En cada caso se presentan resultados correspondientes a:

- Tabla resumen de pérdida anual esperada (AAL) y pérdida máxima probable (PML)
- Curvas de tasas de excedencia de pérdidas y de PML con el período de retorno
- Diagrama de barras con los valores de AAL en valor y en millar discriminados para cada uno de los sectores de uso.



**Figura 157**

Ejemplo de resultados por viento para Guatemala

La Figura 158 resume los valores de PML para periodos de retorno de 250, 500 y 1000 años para cada uno de los departamentos tanto en valor como en porcentaje.

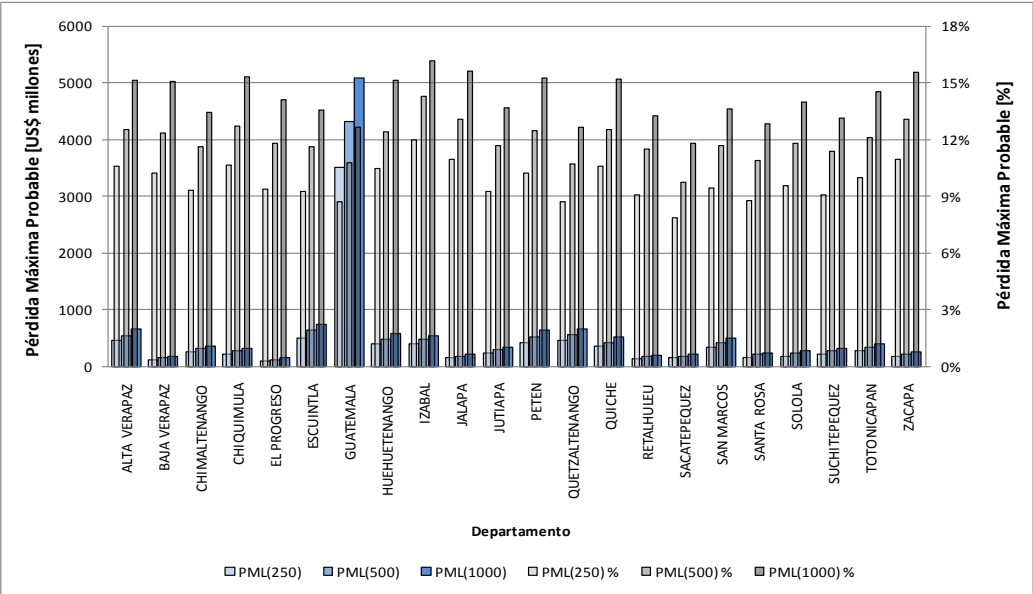


Figura 158

Valores de PML por viento y para varios periodos de retorno en cada departamento

Por otro lado la Figura 159 presenta los valores correspondientes de AAL tanto en valor como al millar.

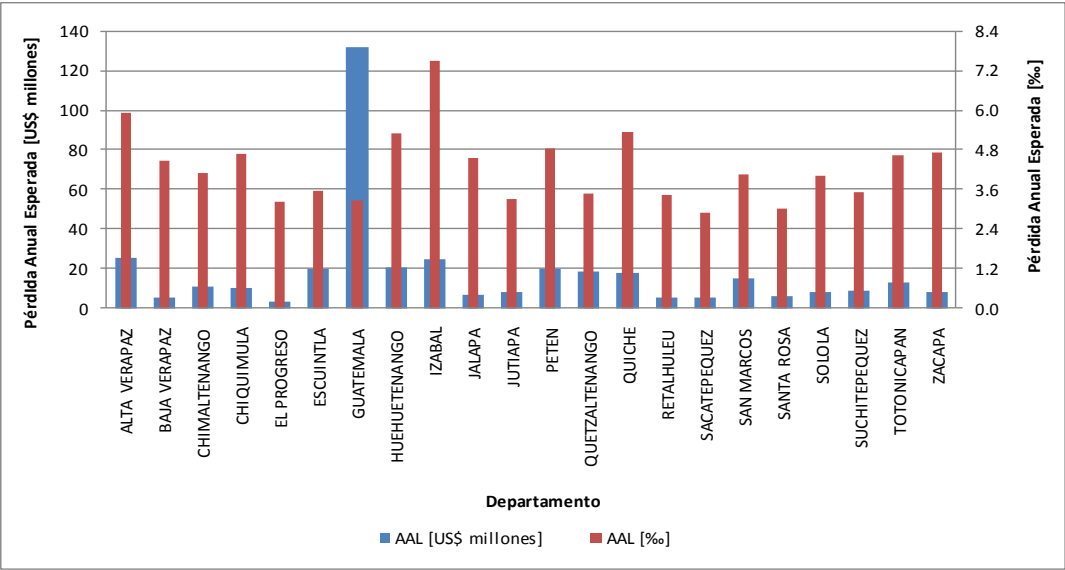
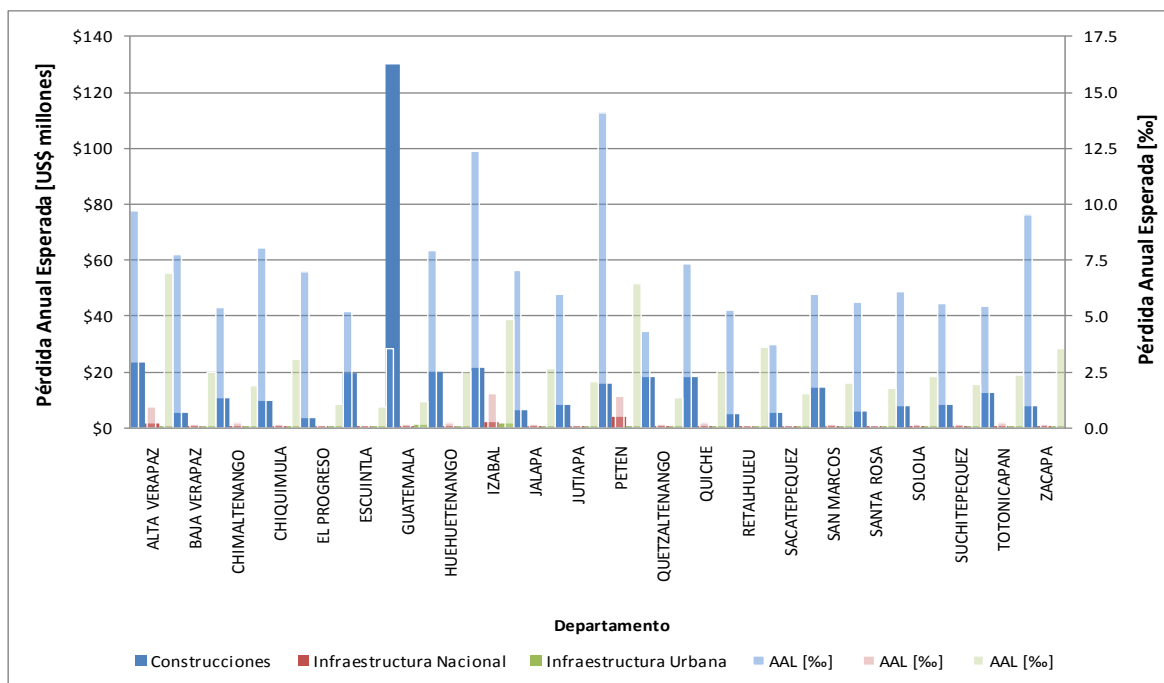


Figura 159

Valores de AAL por viento por departamento

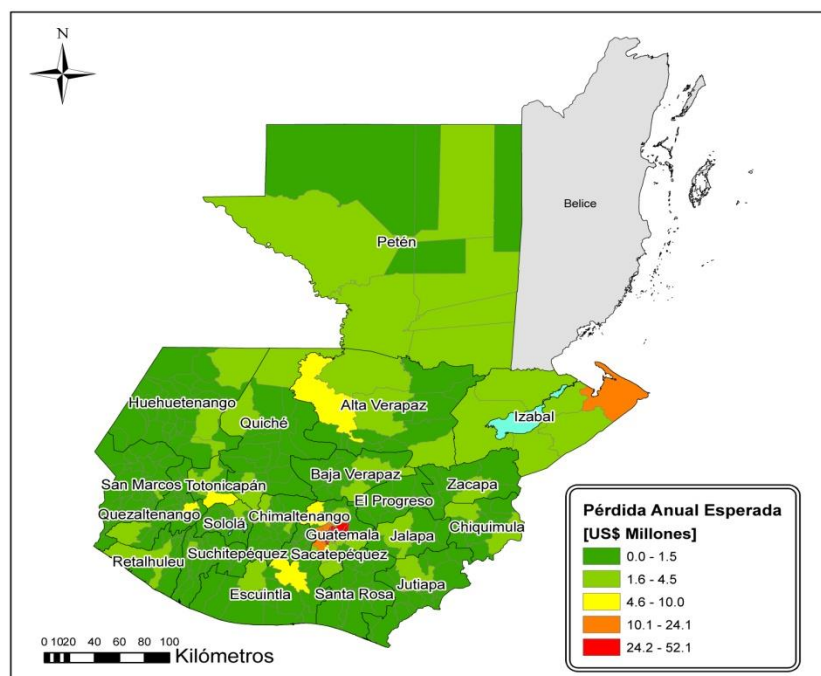
En la Figura 160 se presenta el desglose de las pérdidas anuales esperadas por sectores para cada uno de los departamentos. Los sectores considerados son las construcciones urbanas, la infraestructura urbana y la infraestructura nacional asociada con cada departamento.



**Figura 160**

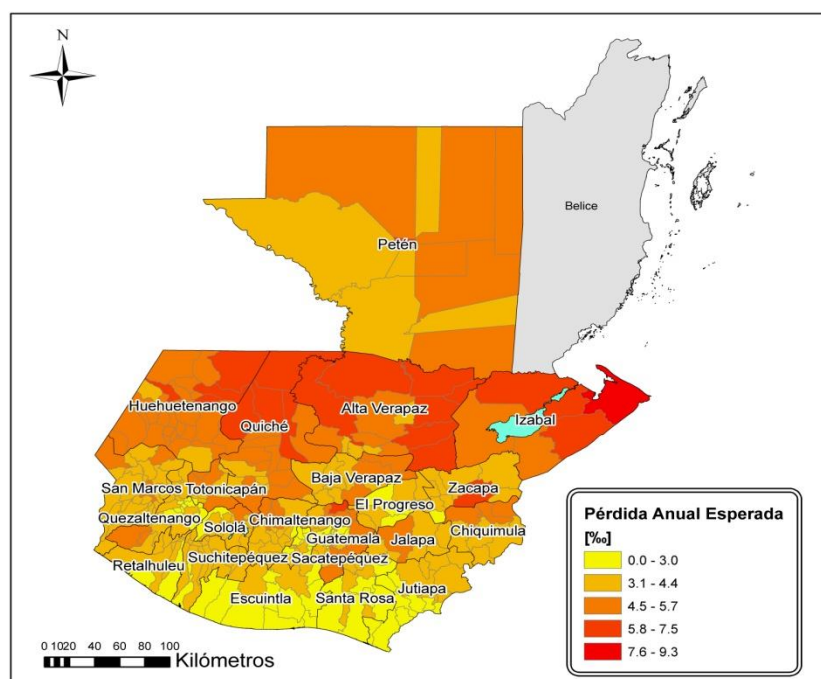
Valores de AAL por viento por departamento desglosada por sectores

Finalmente la Figura 161 y la Figura 162 presentan la distribución geográfica de la pérdida anual esperada en valor y al millar para cada uno de los municipios. Por otro lado la Figura 163 y la Figura 164 presentan la pérdida máxima probable en valor y en porcentaje para cada uno de los departamentos.



**Figura 161**

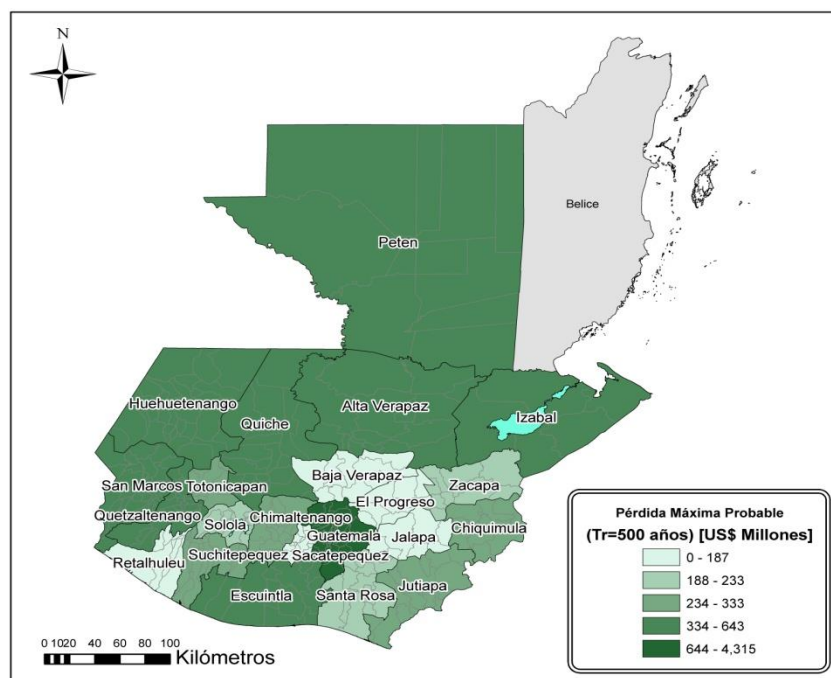
Distribución geográfica de AAL (valor) por viento y por municipio



**Figura 162**

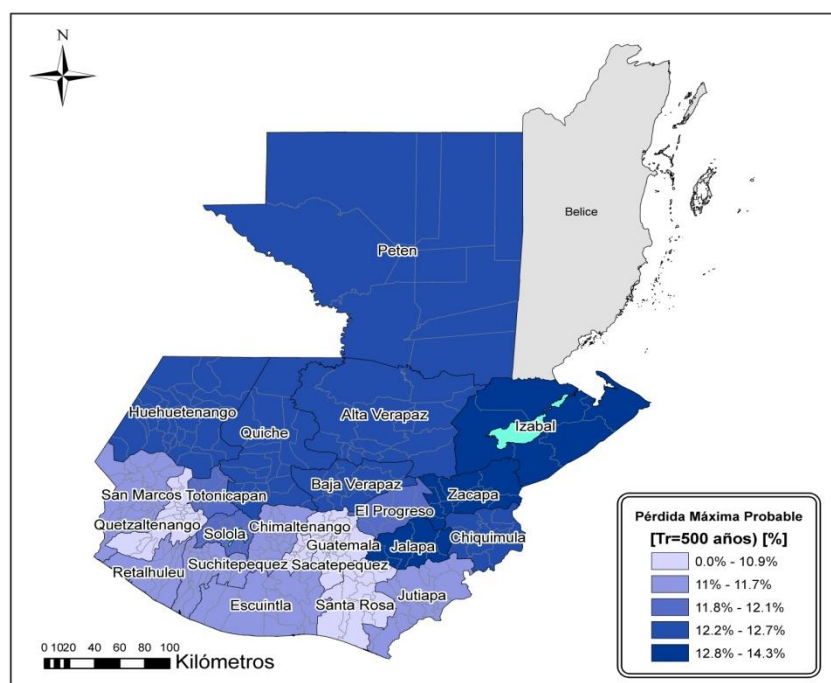
Distribución geográfica de AAL (%) por viento y por municipio





**Figura 163**

Distribución geográfica de PML (valor) por viento y por departamento

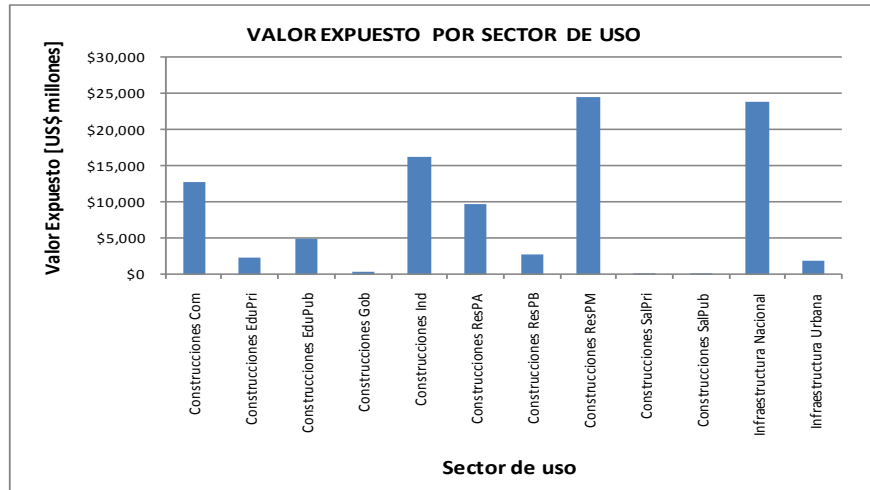


**Figura 164**

Distribución geográfica de PML (%) por viento y por departamento

## 9.2.2 Comparación de pérdidas por sector

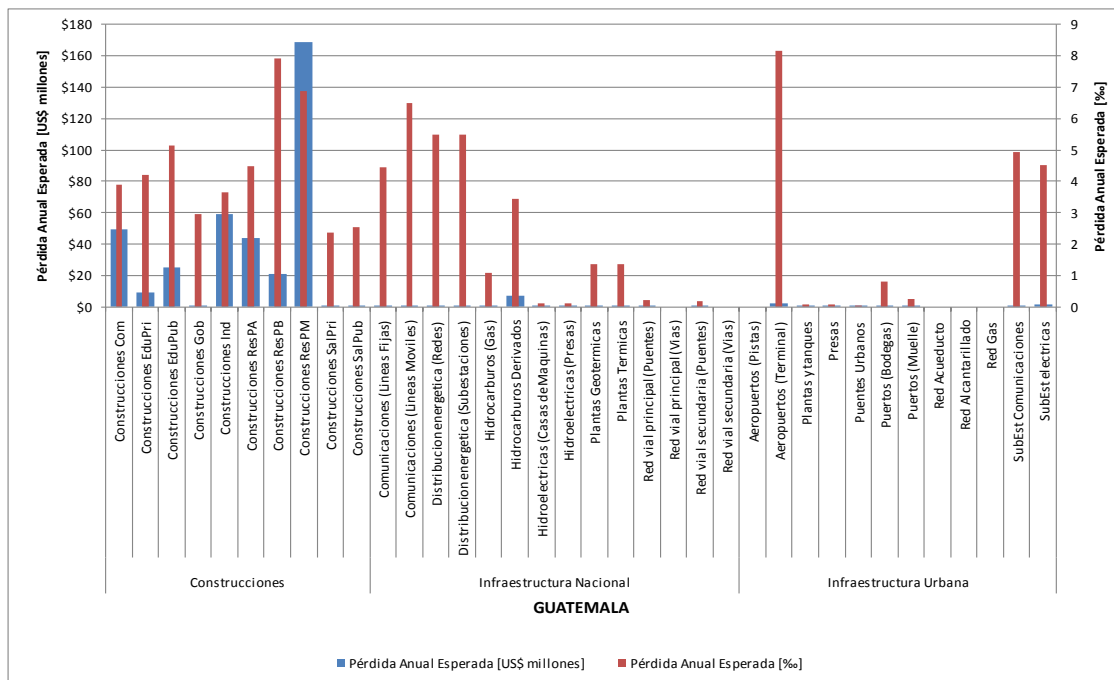
La Figura 165 presenta la comparación de los valores expuestos por sector a nivel del país.



**Figura 165**

Valores expuestos por sectores

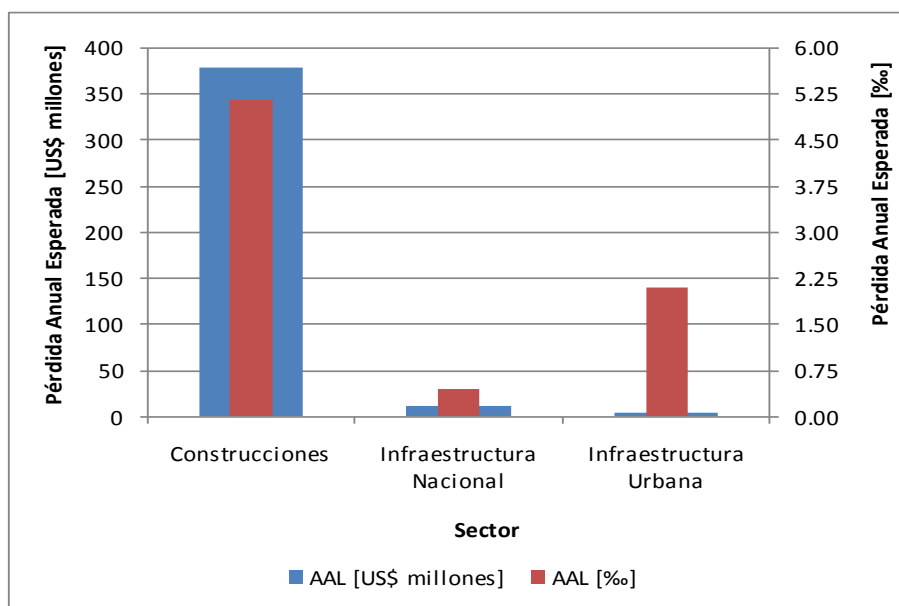
La Figura 166 totaliza la pérdida anual esperada en valor y al millar para cada uno de los sectores de uso y para todo el país en forma agregada.



**Figura 166**

Valores de AAL por viento con cambio climático y sectores

Por otro lado y en forma más resumida, la Figura 167 presenta los resultados equivalentes a la totalización de los resultados para los tres sectores de uso principales que corresponden a construcciones urbanas, infraestructura urbana e infraestructura nacional.



**Figura 167**

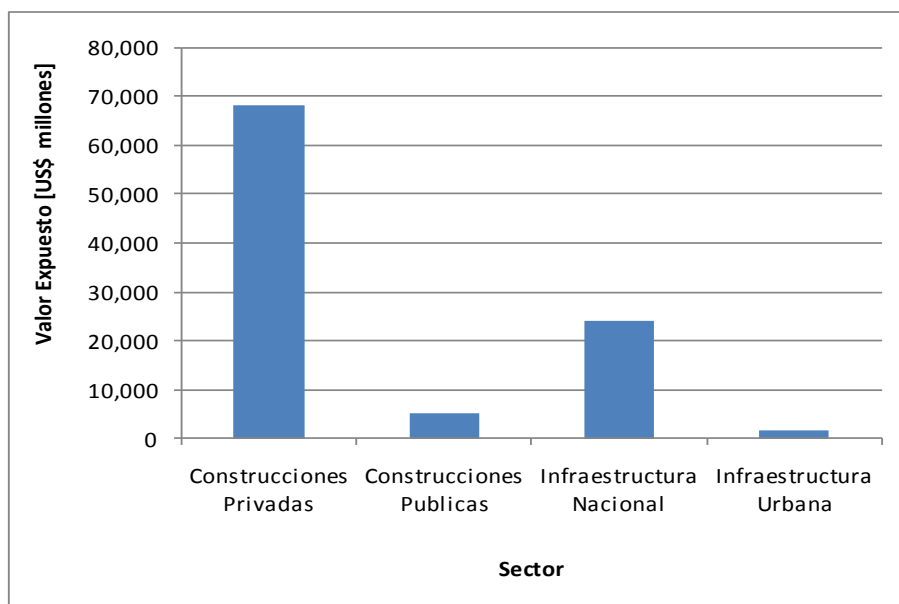
Resumen de distribución de valores de AAL por viento con cambio climático y por sectores

### 9.2.3 Pérdida máxima probable para sectores público y privado

Para evaluar la pérdida máxima probable para los sectores público y privado es necesario realizar análisis para cada uno de los portafolios que se desee analizar, ya que los resultados de este tipo de análisis dependen de la distribución geográfica relativa de los valores expuestos.

El sector público incluye las construcciones urbanas públicas (salud, educación –cuando son del Estado– y gubernamentales) así como toda la infraestructura. Por su parte el sector privado incluye únicamente las construcciones residenciales, comerciales, industriales y las construcciones respectivas del sector salud y educación.

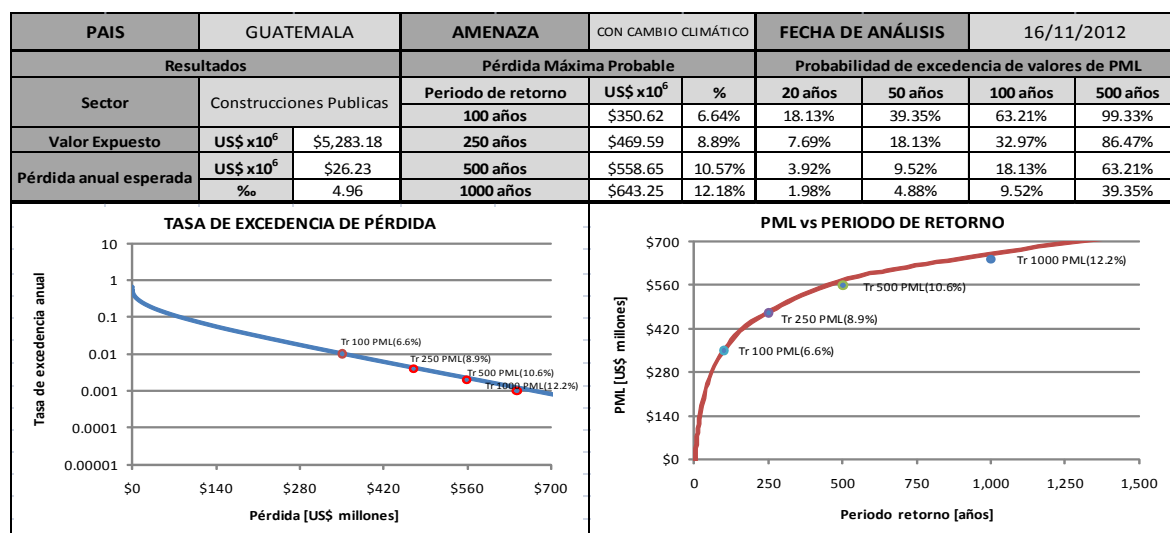
La Figura 168 presenta los valores expuestos a nivel de sector público y privado en el país.



**Figura 168**

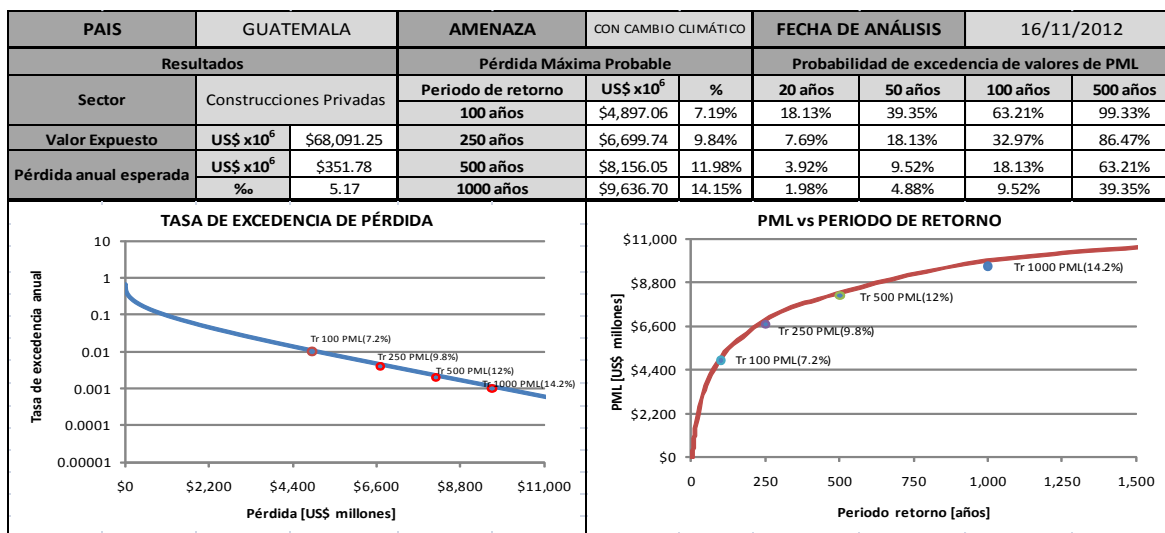
Valores expuestos por sectores

La Figura 169 y la Figura 170 presentan la curva de PML para cada uno de estos sectores.



**Figura 169**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento para construcciones públicas



**Figura 170**

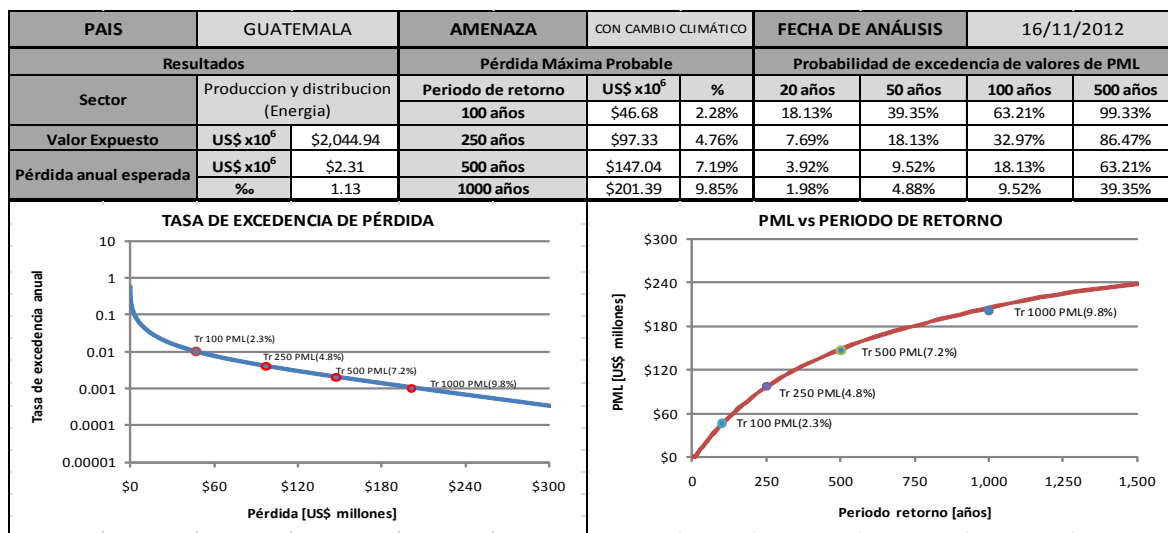
Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento para construcciones privadas

#### 9.2.4 Pérdida máxima probable para la infraestructura nacional

Un análisis similar al anterior se realiza para el sector de infraestructura nacional teniendo en cuenta los siguientes análisis:

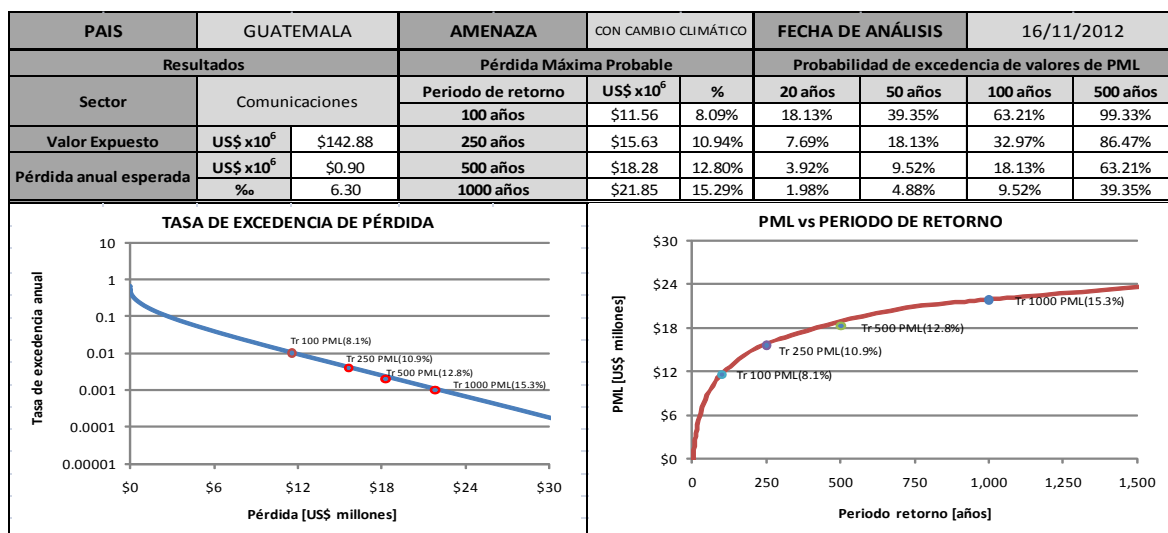
- Generación y distribución de energía
- Comunicaciones
- Hidrocarburos

Para cada uno de estos sectores se presentan los resultados de curvas de PML vs. periodo de retorno y valores globales de AAL en valor y en millares. De la Figura 171 a la Figura 173 se resumen estos resultados. En el Anexo 3 se presentan los resultados para los demás sectores.



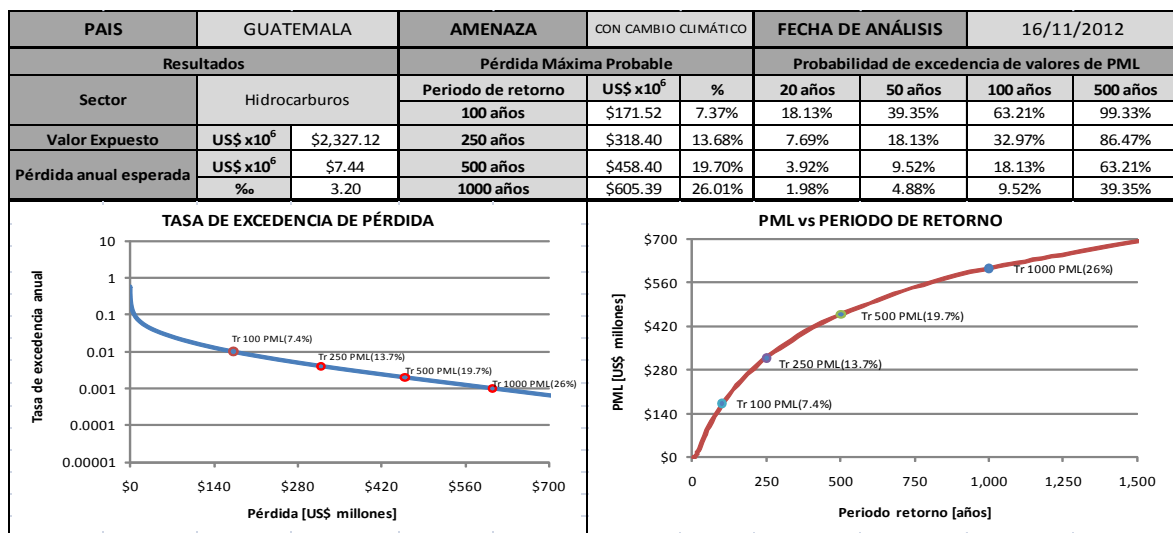
**Figura 171**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento con cambio climático para sector energía



**Figura 172**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento con cambio climático para sector comunicaciones



**Figura 173**

Curva de excedencia de pérdidas y de PML por viento con cambio climático para sector de hidrocarburos

## 10. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL PERFIL DE RIESGO

### 10.1 Pérdida anual esperada y pérdida máxima probable

Con base en los resultados presentados en los capítulos anteriores, la Tabla 35 resume los resultados a nivel del país para un análisis comparativo de riesgo por huracán sin incluir el impacto del cambio climático y por huracán incluyendo el impacto del cambio climático.

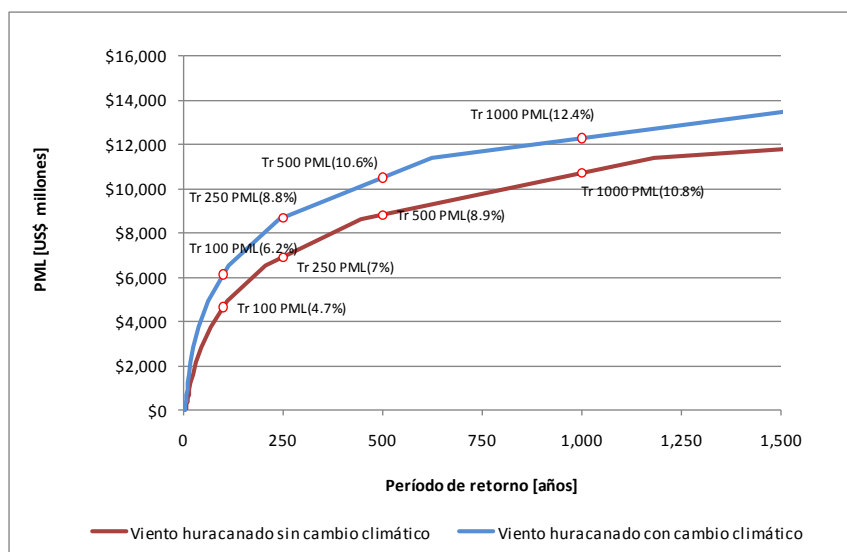
**Tabla 35**

**Comparación de resultados de AAL y PML por viento huracanado sin cambio climático y con cambio climático**

Resultados					
Amenaza		Huracán sin cambio climático		Huracán con cambio climático	
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	\$99,017			
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 <sup>6</sup>	\$231		\$393	
	‰	2.3		4.0	
PML					
Periodo retorno		Pérdida			
años		US\$ x10 <sup>6</sup>	%	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50		\$3,069	3.1%	\$4,338	4.4%
100		\$4,644	4.7%	\$6,114	6.2%
250		\$6,907	7.0%	\$8,680	8.8%
500		\$8,820	8.9%	\$10,493	10.6%
1000		\$10,711	10.8%	\$12,277	12.4%

La Figura 174 presenta la comparación de las dos curvas de PML contra período de retorno.



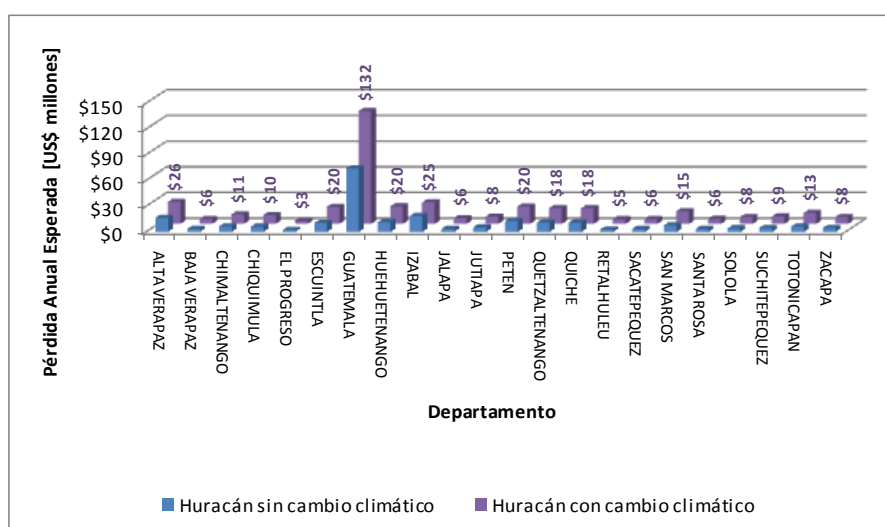


**Figura 174**

Comparación de las curvas de PML para los dos análisis

## 10.2 Pérdida anual esperada por departamento

La Figura 175 presenta las pérdidas anuales esperadas en forma comparativa por huracán sin incluir el cambio climático y por huracán incluyendo el cambio climático para cada uno de los departamentos.



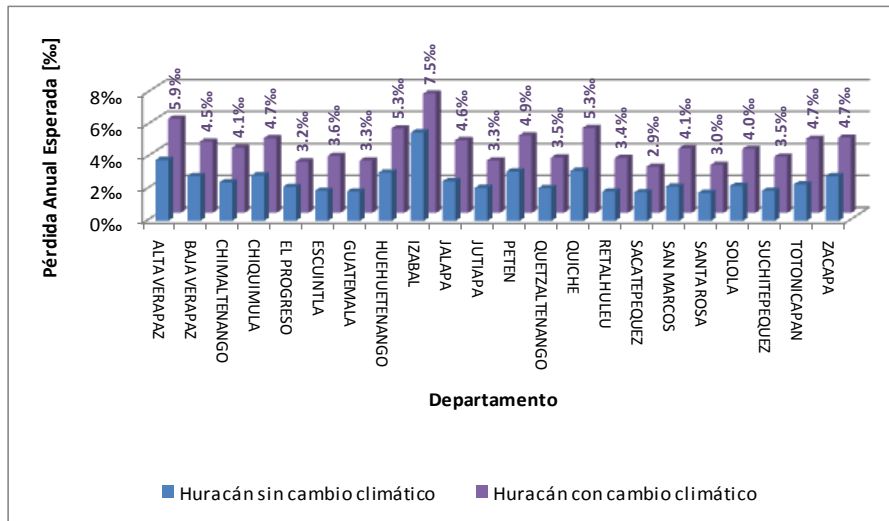
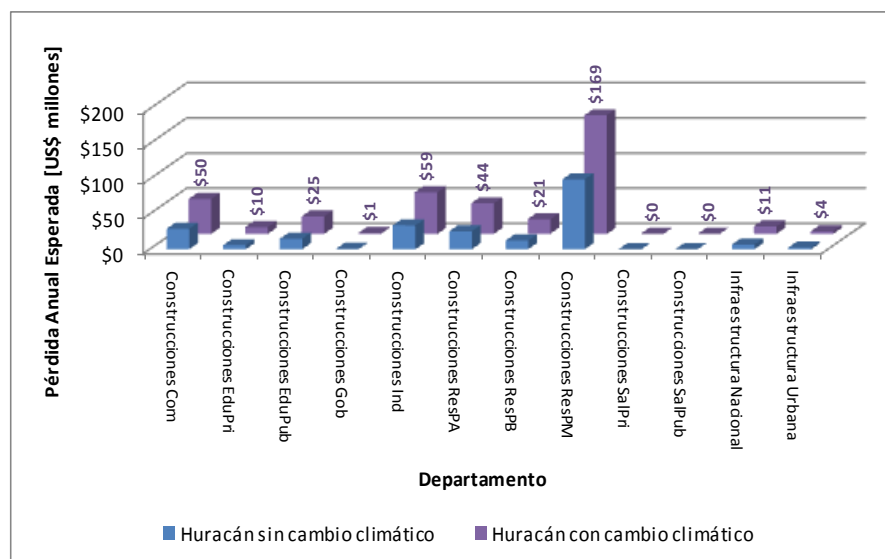


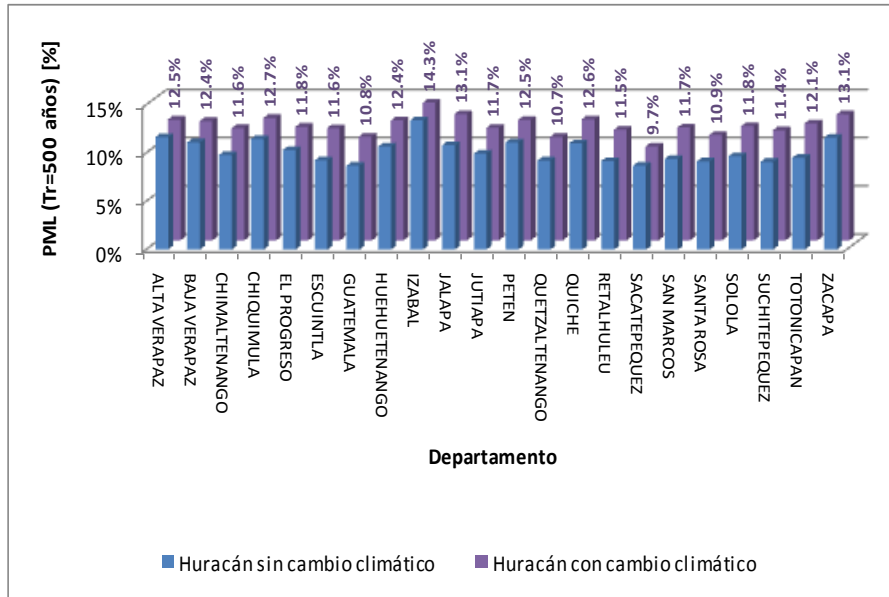
Figura 175

Valores de AAL para huracán sin y con el efecto del cambio climático para cada uno de los departamentos

### 10.3 Pérdida anual esperada por sector

La Figura 176 presenta las pérdidas anuales esperadas en forma comparativa por huracán sin incluir el impacto del cambio climático y por huracán incluyendo el impacto del cambio climático para los diferentes sectores.



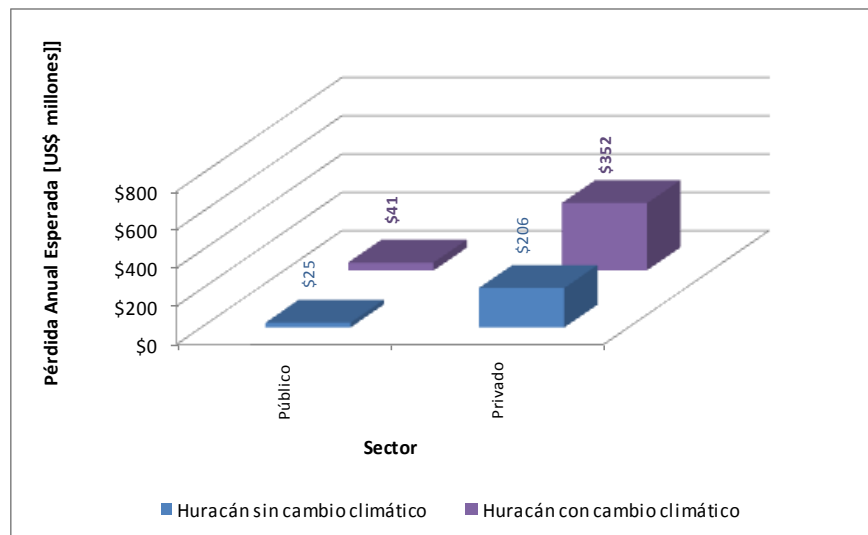


**Figura 176**

Valores de AAL para huracán sin y con el efecto del cambio climático para los diferentes sectores

#### 10.4 Pérdida anual esperada por sectores público y privado

La Figura 177 presenta las pérdidas anuales esperadas en forma comparativa para terremoto y viento huracanado para cada uno de los sectores público y privado.



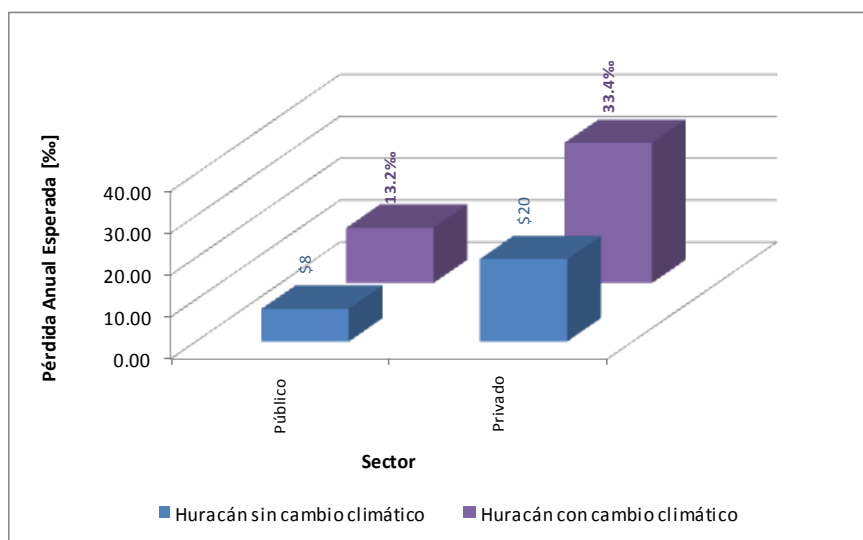
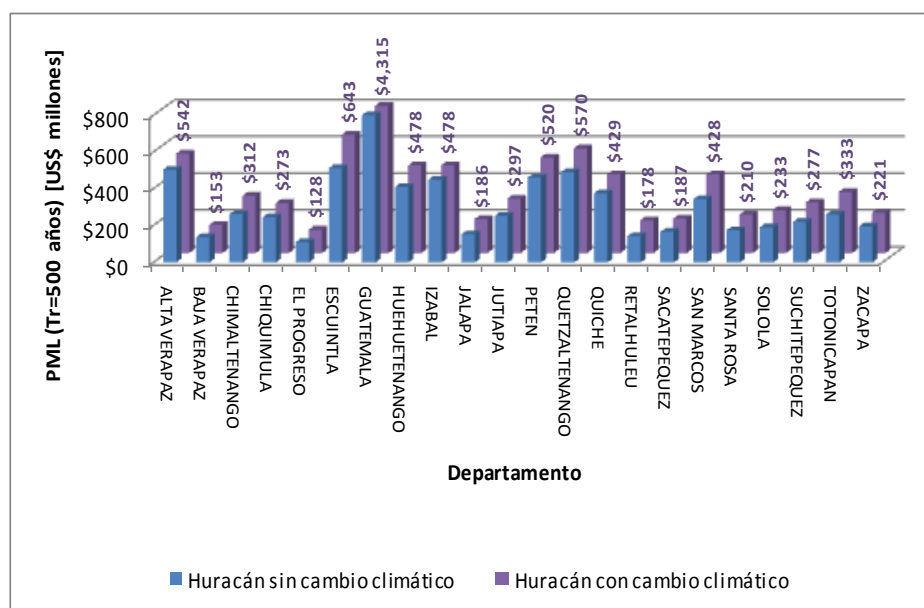


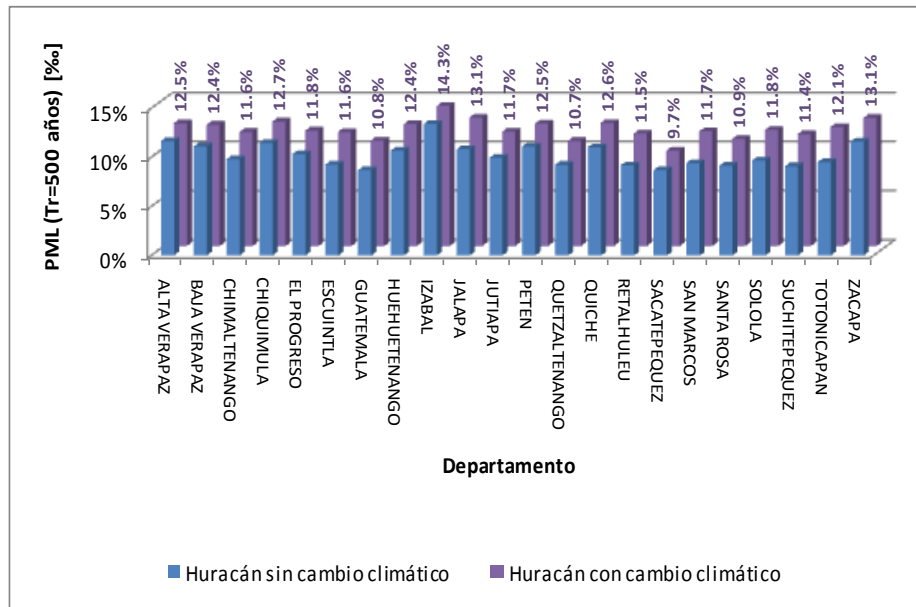
Figura 177

Valores de AAL para huracán sin y con el cambio climático para sectores público y privado

## 10.5 Pérdida máxima probable por departamento

La Figura 178 muestra los valores comparativos de PML por departamento para los eventos de viento huracanado sin incluir el efecto del cambio climático e incluyendo el efecto del cambio climático.



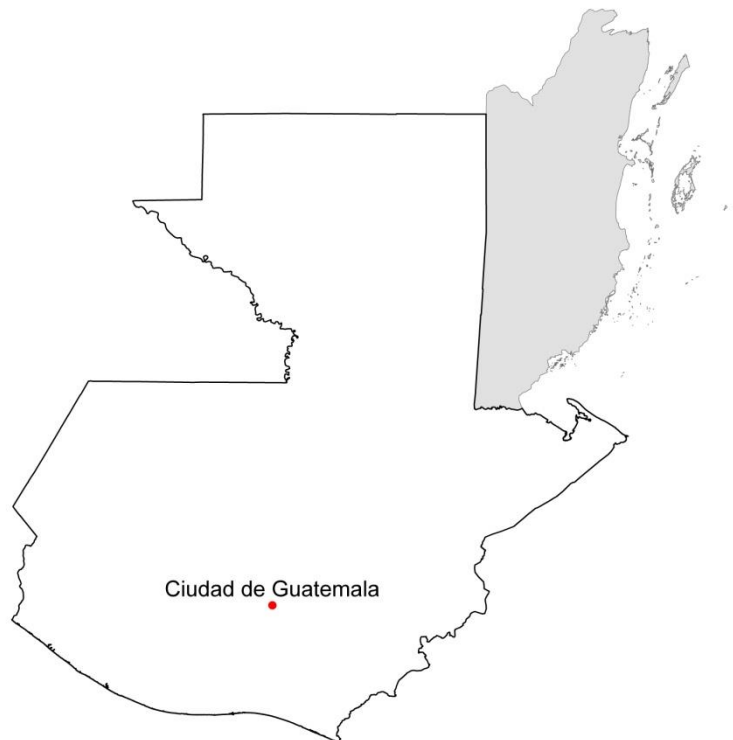


**Figura 178**  
Valores de PML para huracán sin y con el cambio climático por departamento

## 11. ANÁLISIS DE RIESGO PARA LA CIUDAD DE GUATEMALA

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas económicas por vientos huracanados para Ciudad de Guatemala. El riesgo fue calculado tanto para condiciones actuales de amenaza como incorporando el impacto asociado al cambio climático. La metodología aplicada para el cálculo probabilista de riesgo se presenta en el Anexo 3.

Ciudad de Guatemala, capital de Guatemala, es una ciudad con una población de aproximadamente 935,810 habitantes. Se encuentra localizada a 80 kilómetros de la Costa Pacífica. Cuenta con una extensión de 124 km<sup>2</sup> y dentro del área metropolitana da cabida a aproximadamente 210,000 predios distribuidos principalmente en uso residencial y comercial, y en menor medida con uso institucional e industrial. El sistema estructural predominante en la ciudad es la mampostería, tanto simple, como confinada y reforzada.



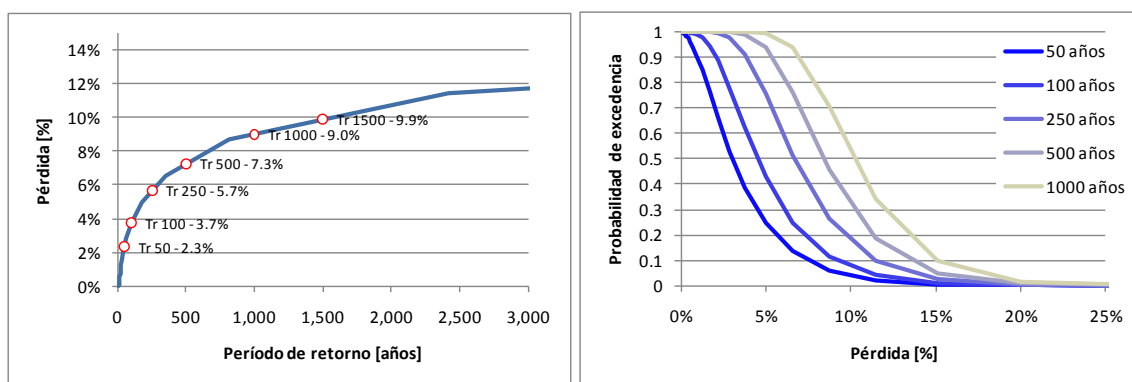
**Figura 179**

Localización geográfica de Ciudad de Guatemala

## 11.1 Resultados de riesgo por viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 36**  
**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	25,088
Pérdida Anual	US\$ x10 <sup>6</sup>	41.02
Esperada	‰	1.63‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50	582.50	2.3%
100	934.19	3.7%
250	1,420.76	5.7%
500	1,822.91	7.3%
1,000	2,261.68	9.0%
1,500	2,480.10	9.9%



**Figura180**

Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

Tabla 37

Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)

Sistema	Valor expuesto		Pérdida anual esperada	
	[US\$ millones]	[%]	[US\$ millones]	[‰]
A-SPSB-1	1,507.61	6.01%	2.80	1.86‰
B-SLFB-1	388.81	1.55%	2.47	6.36‰
CP-FLSB-2	2,656.43	10.59%	4.97	1.87‰
MC-RCSM-4	5,708.16	22.75%	1.60	0.28‰
MC-RCSM-5	338.76	1.35%	0.07	0.2‰
MC-RLSB-2	1,352.65	5.39%	2.50	1.85‰
MR-RCSB-2	3,908.41	15.58%	1.84	0.47‰
MR-RLSB-2	2,120.45	8.45%	3.98	1.88‰
MR-SLSB-1	2,540.62	10.13%	9.73	3.83‰
MS-SLSB-1	391.85	1.56%	1.47	3.76‰
PAA-SLSB-B	1,699.91	6.78%	6.48	3.81‰
PCR-RCSM-5	2,040.07	8.13%	0.37	0.18‰
W-SLFB-1	434.29	1.73%	2.74	6.31‰
<b>TOTAL</b>	<b>25,088.01</b>	<b>100.00%</b>	<b>41.02</b>	<b>1.63‰</b>

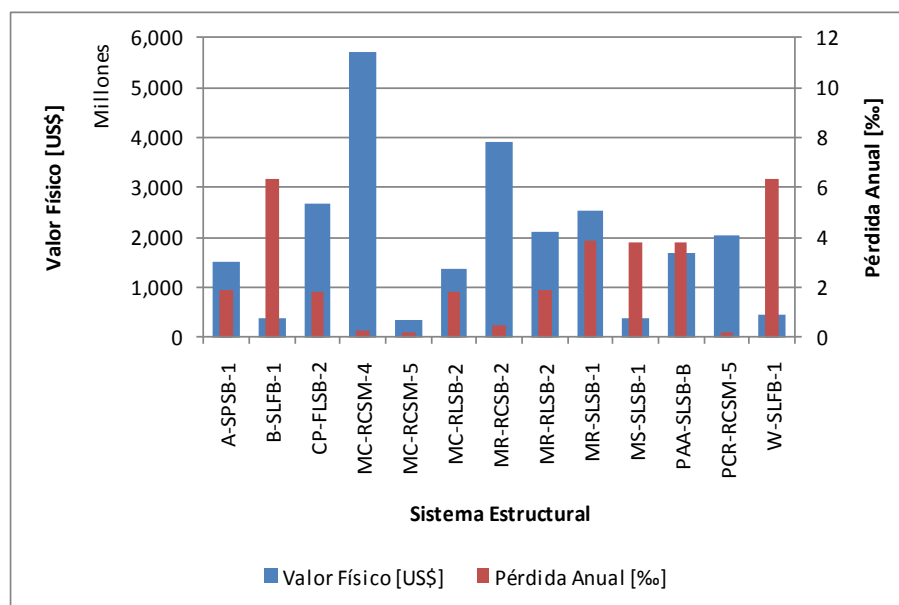
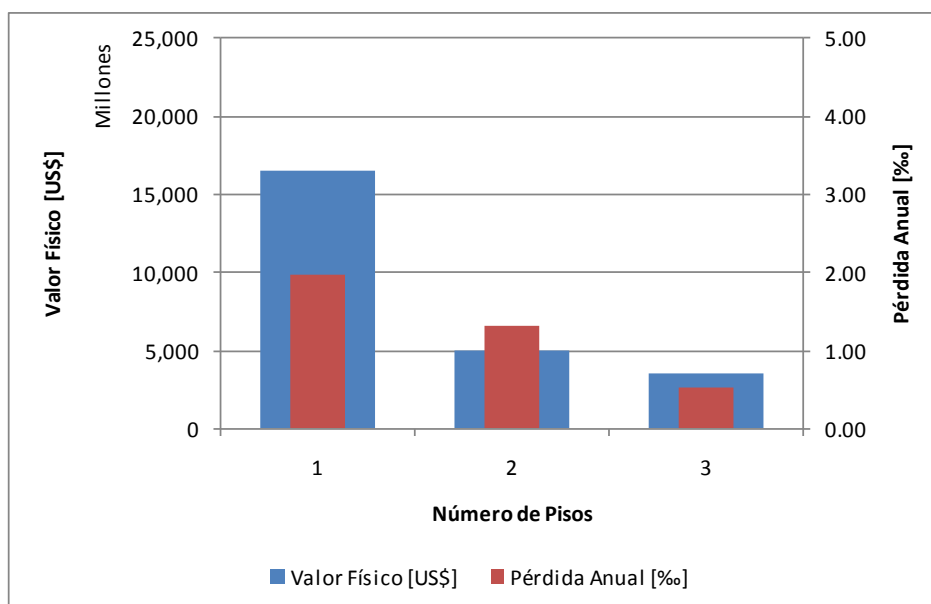


Figura 181

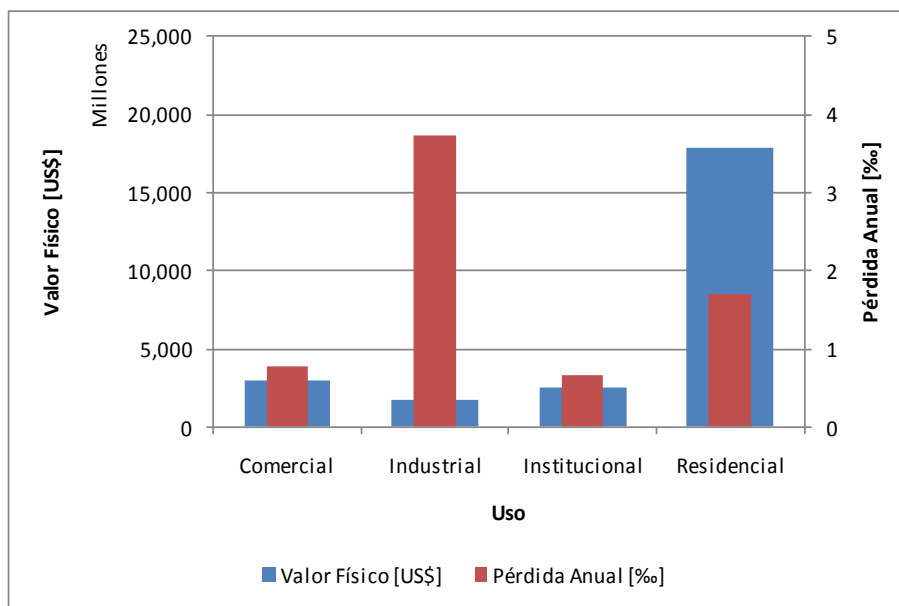
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural





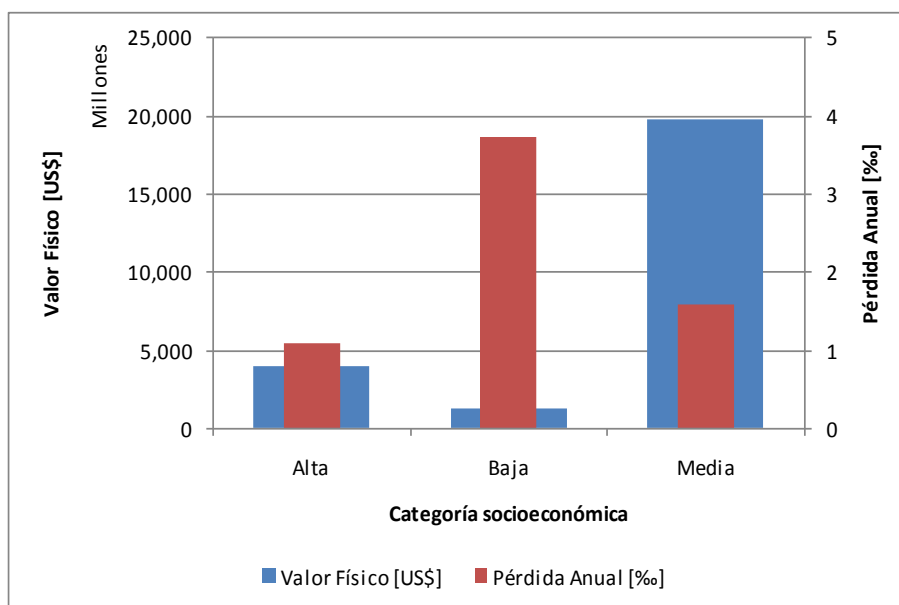
**Figura 182**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 183**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



**Figura 184**

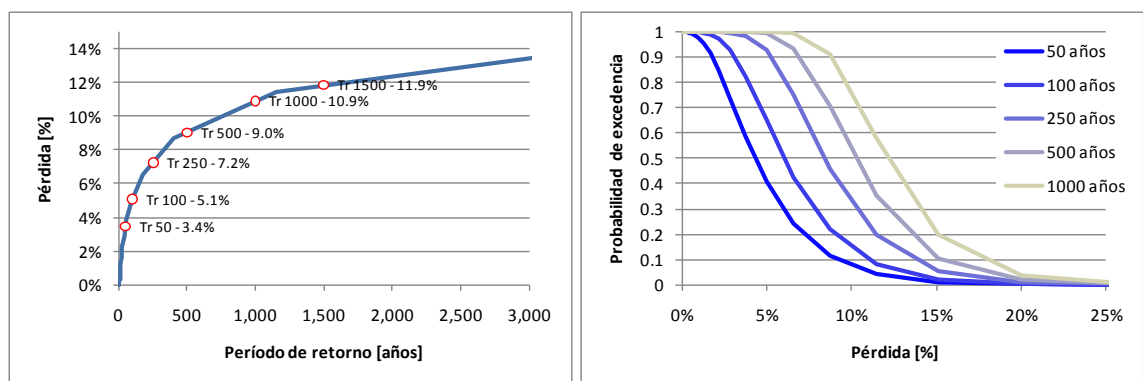
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socioeconómica

## 11.2 Resultados de riesgo por viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 38**

**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>6</sup>	25,088.01
Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>6</sup>	69.91
Esperada	‰	2.79‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x 10 <sup>6</sup>	%
50	864.96	3.4%
100	1,272.34	5.1%
250	1,812.98	7.2%
500	2,267.63	9.0%
1,000	2,736.23	10.9%
1,500	2,974.00	11.9%



**Figura185**

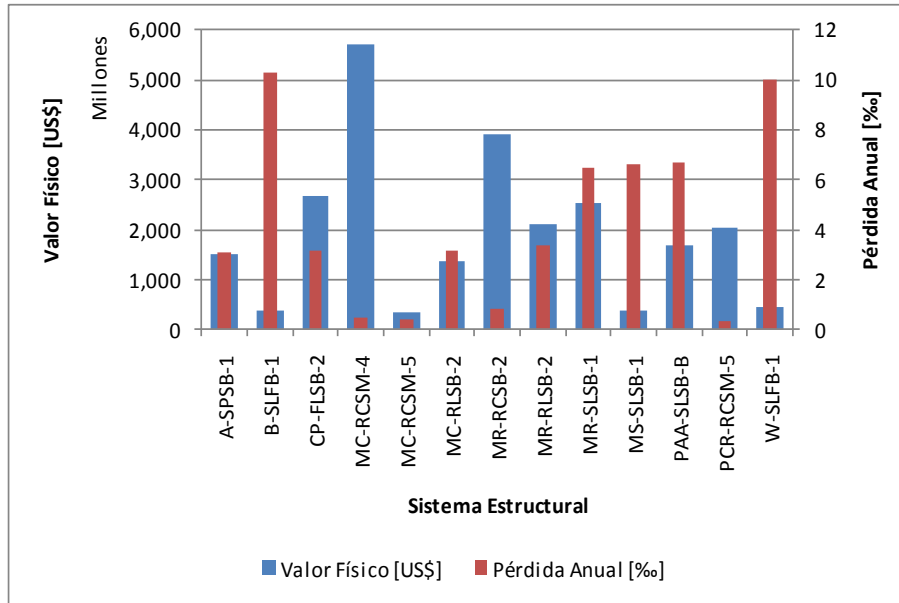
Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

**Tabla 39**

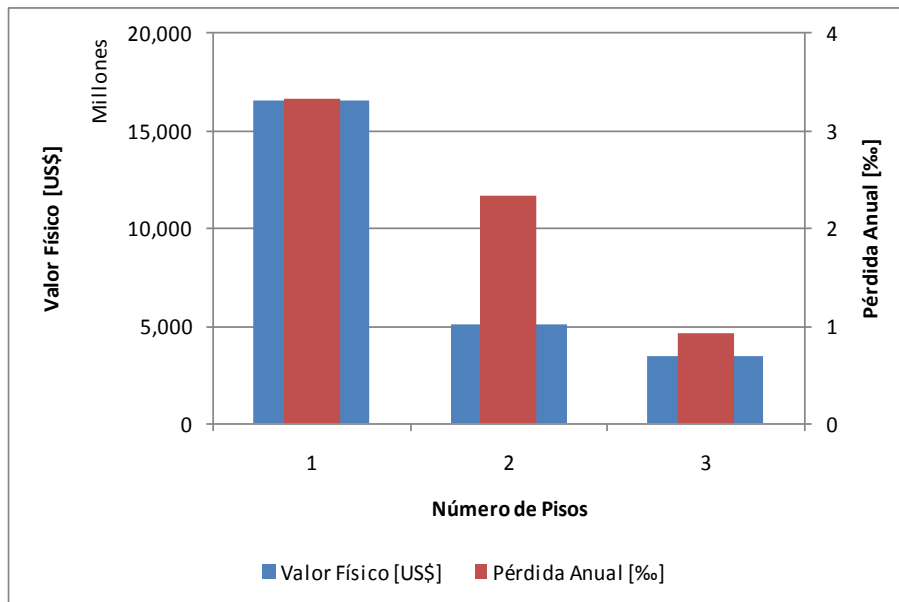
**Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)**

Sistema	Valor expuesto		Pérdida anual esperada	
	[US\$ millones]	[%]	[US\$ millones]	[‰]
A-SPSB-1	1,507.61	6.01%	4.65	3.09‰
B-SLFB-1	388.81	1.55%	4.00	10.29‰
CP-FLSB-2	2,656.43	10.59%	8.45	3.18‰
MC-RCSM-4	5,708.16	22.75%	2.73	0.48‰
MC-RCSM-5	338.76	1.35%	0.13	0.39‰
MC-RLSB-2	1,352.65	5.39%	4.24	3.14‰
MR-RCSB-2	3,908.41	15.58%	3.14	0.8‰
MR-RLSB-2	2,120.45	8.45%	7.07	3.34‰
MR-SLSB-1	2,540.62	10.13%	16.51	6.5‰
MS-SLSB-1	391.85	1.56%	2.58	6.59‰
PAA-SLSB-B	1,699.91	6.78%	11.37	6.69‰
PCR-RCSM-5	2,040.07	8.13%	0.66	0.32‰
W-SLFB-1	434.29	1.73%	4.36	10.04‰
<b>TOTAL</b>	<b>25,088.01</b>	<b>100.00%</b>	<b>69.91</b>	<b>2.79‰</b>



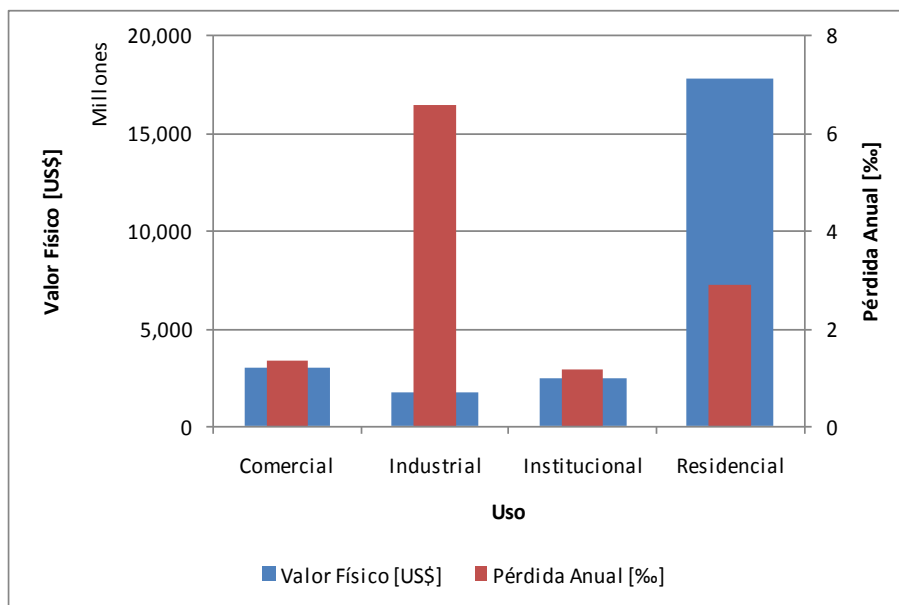
**Figura 186**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



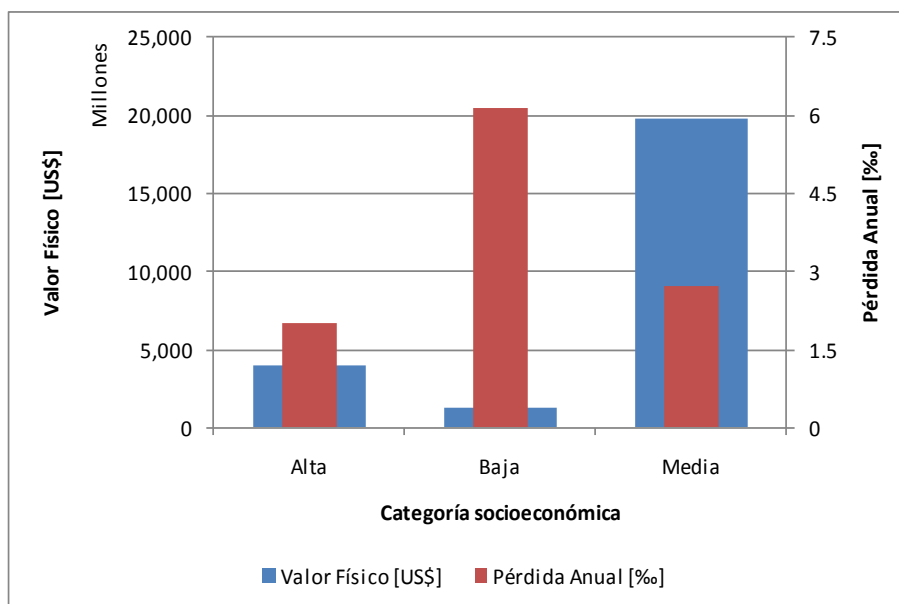
**Figura 187**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 188**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso

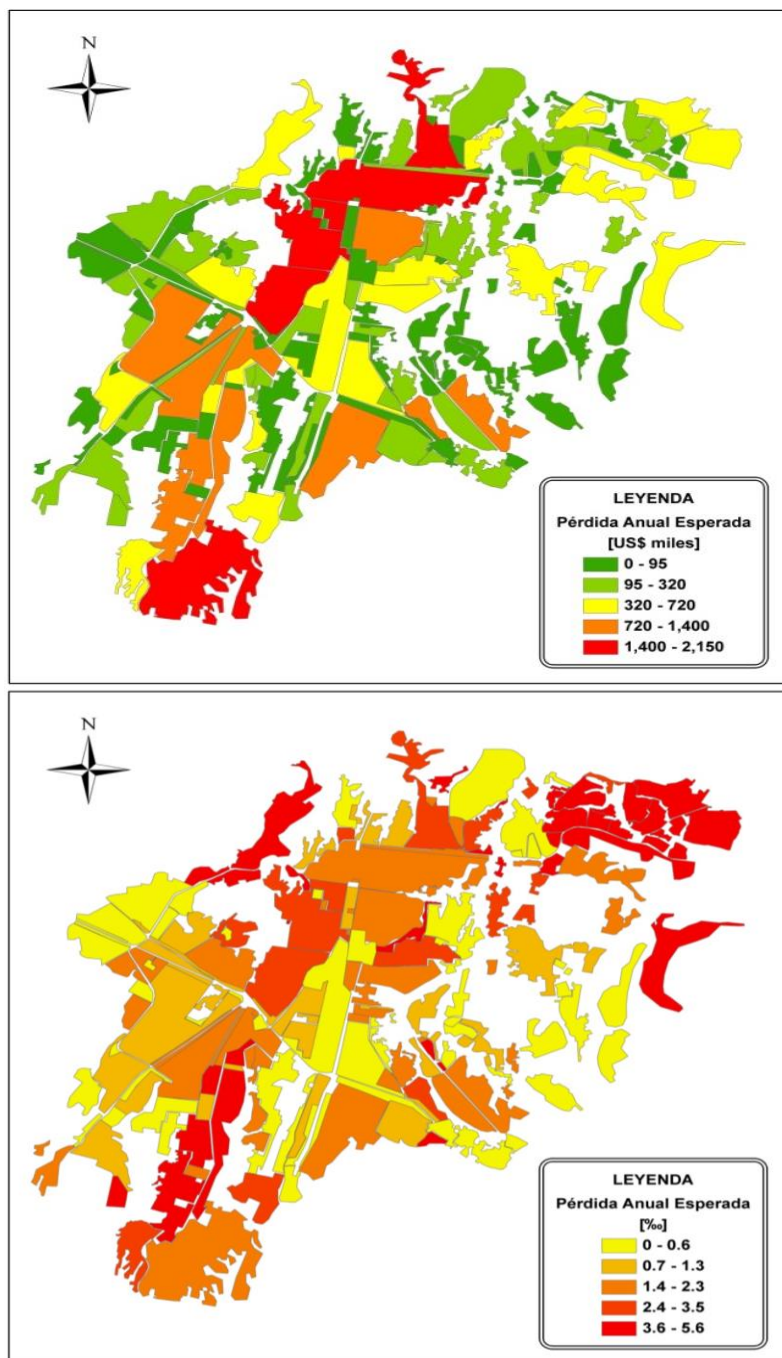


**Figura 189**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socioeconómica

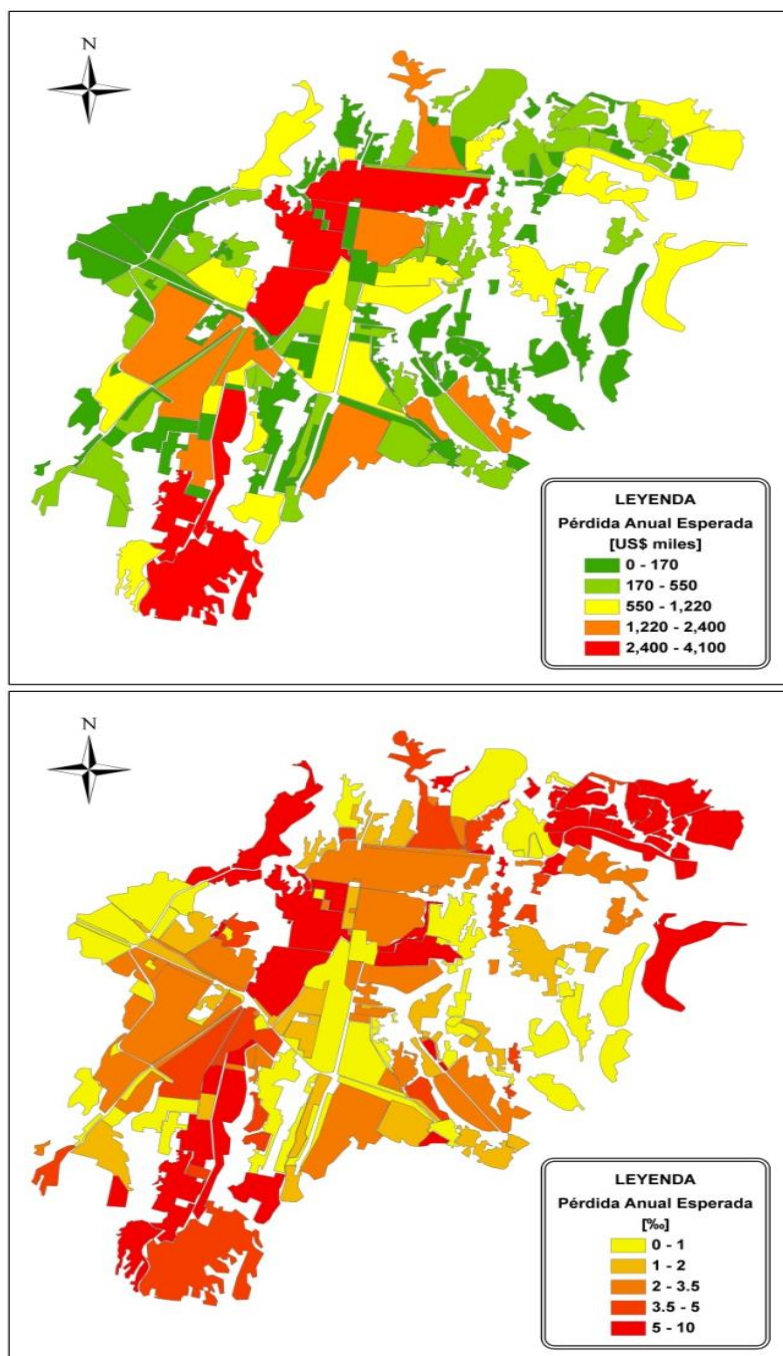
### **11.3 Mapas de riesgo**

La información anterior se puede visualizar mediante mapas de riesgo. La Figura 190 presenta la distribución geográfica de la pérdida anual esperada por zona homogénea para viento huracanado sin el efecto del cambio climático. Los resultados se presentan al millar del valor expuesto y en valor económico. La Figura 191 presenta los resultados equivalentes para vientos huracanados teniendo en cuenta el efecto del cambio climático.



**Figura 190**

Pérdida anual esperada por zona homogénea para viento huracanado sin cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$ miles; abajo: al millar del valor expuesto)



**Figura 191**

Pérdida anual esperada por zona homogénea para viento huracanado con cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$ miles; abajo: al millar del valor expuesto)



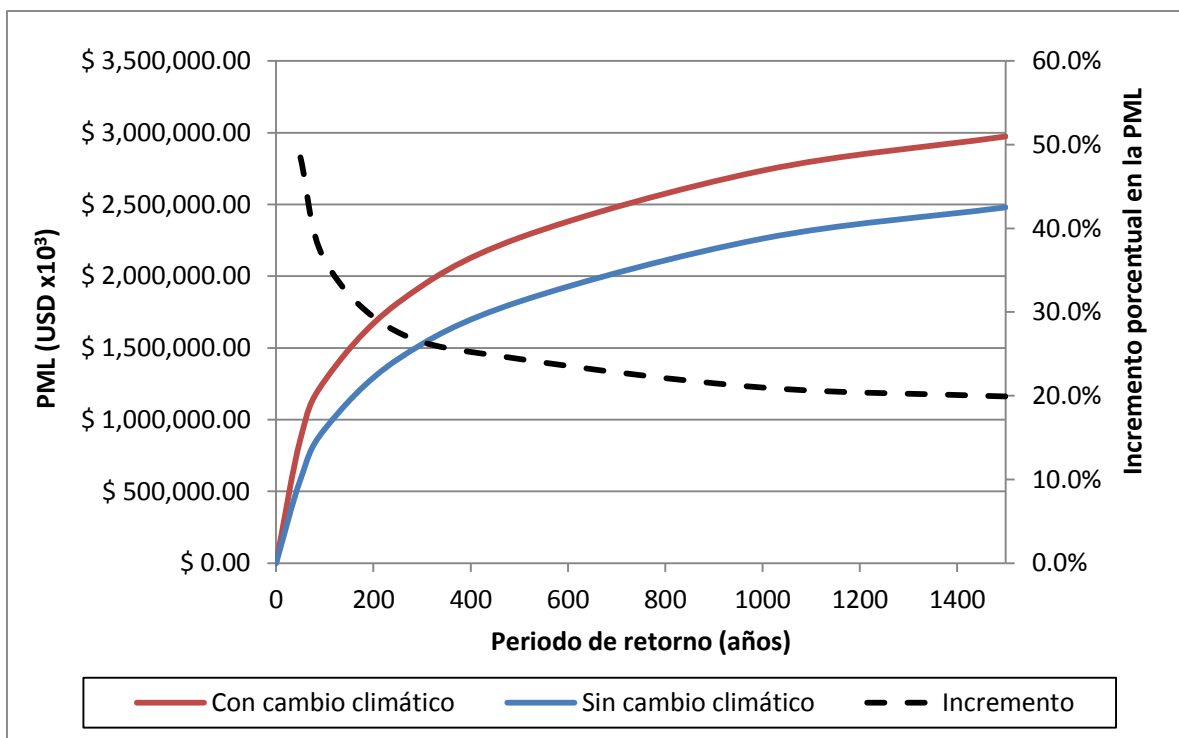
## 11.4 Comparación de resultados

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de riesgo con y sin cambio climático. Se presenta adicionalmente el incremento porcentual en la Pérdida anual esperada y en los valores de Pérdida máxima probable (PML) para los periodos de retorno seleccionados. De los resultados presentados es posible ver como la pérdida anual esperada presenta un incremento de más del 70% al incorporar en el análisis el impacto del cambio climático. Por otra parte, los valores de PML presentan incrementos entre el 49% y el 20 %, con una variación inversa con relación al periodo de retorno.

En la Figura192 se presentan de manera gráfica los resultados asociados a la PML.

**Tabla 40**  
**Comparación de resultados generales**

Con cambio climático			Sin cambio climático			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	25,088,009	Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	25,088,009	70.4%
Pérdida Anual Esperada	US\$ x 10 <sup>3</sup>	69,914.485	Pérdida Anual Esperada	US\$ x 10 <sup>6</sup>	41,018.427	
	‰	2.8‰		‰	1.6‰	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		
años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	
50	864,961.54	3.4%	50	582,500.90	2.3%	48.5%
100	1,272,338.71	5.1%	100	934,191.90	3.7%	36.2%
250	1,812,975.00	7.2%	250	1,420,759.86	5.7%	27.6%
500	2,267,625.24	9.0%	500	1,822,912.50	7.3%	24.4%
1,000	2,736,229.76	10.9%	1,000	2,261,683.82	9.0%	21.0%
1,500	2,974,004.95	11.9%	1,500	2,480,099.26	9.9%	19.9%



**Figura192**  
Curvas de PML y su incremento porcentual

## 12. ANÁLISIS DE RIESGO PARA OCÓS

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas económicas por vientos huracanados para Ocós. El riesgo fue calculado tanto para condiciones actuales de amenaza como incorporando el impacto asociado al cambio climático. La metodología aplicada para el cálculo probabilista de riesgo se presenta en el Anexo 3.

Ocós, municipio del departamento de San Marcos es una población con aproximadamente 7,100 habitantes. Se encuentra localizado a 280 kilómetros al noroccidente de la Ciudad de Guatemala, sobre la Costa Pacífica en inmediaciones de la frontera con México. Tiene una extensión de 151 km<sup>2</sup>. Tiene alrededor de 950 edificaciones, distribuidas en uso residencial, comercial, institucional e industrial, que corresponden a viviendas de 1 piso en madera y mampostería, principalmente de uso residencial y comercial.



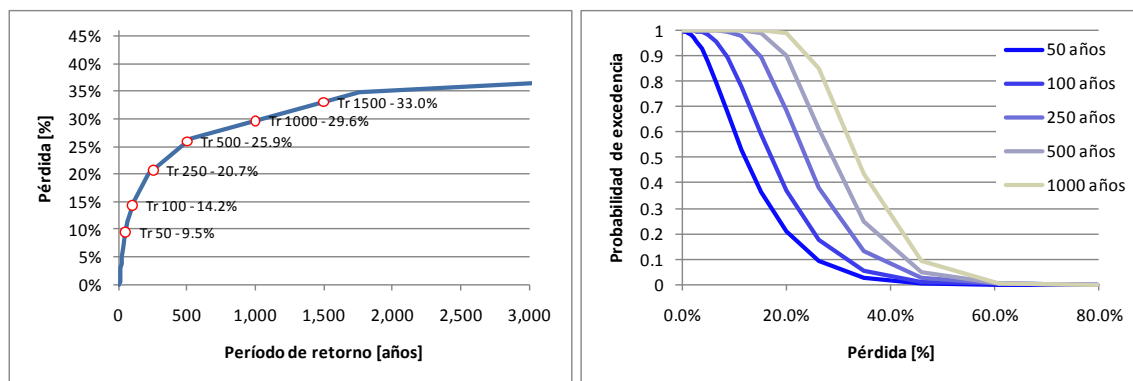
**Figura 193**

Localización geográfica de Ocós

## 12.1 Resultados de riesgo por viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 41**  
**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>6</sup>	20.06
Pérdida Anual Esperada	US\$ x 10 <sup>6</sup>	0.14
	‰	6.7‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x 10 <sup>6</sup>	%
50	1.90	9.5%
100	2.86	14.2%
250	4.15	20.7%
500	5.19	25.9%
1,000	5.94	29.6%
1,500	6.62	33.0%



**Figura194**

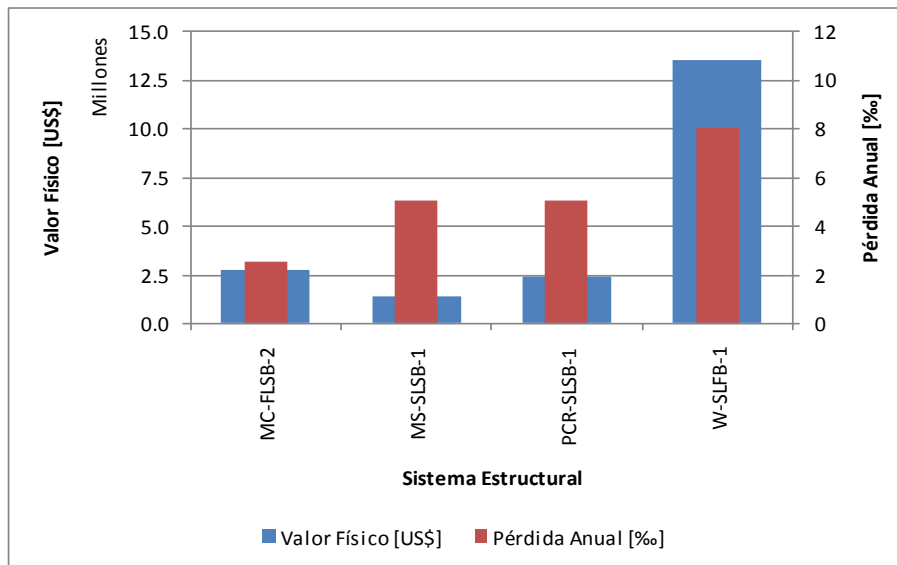
Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

**Tabla 42**

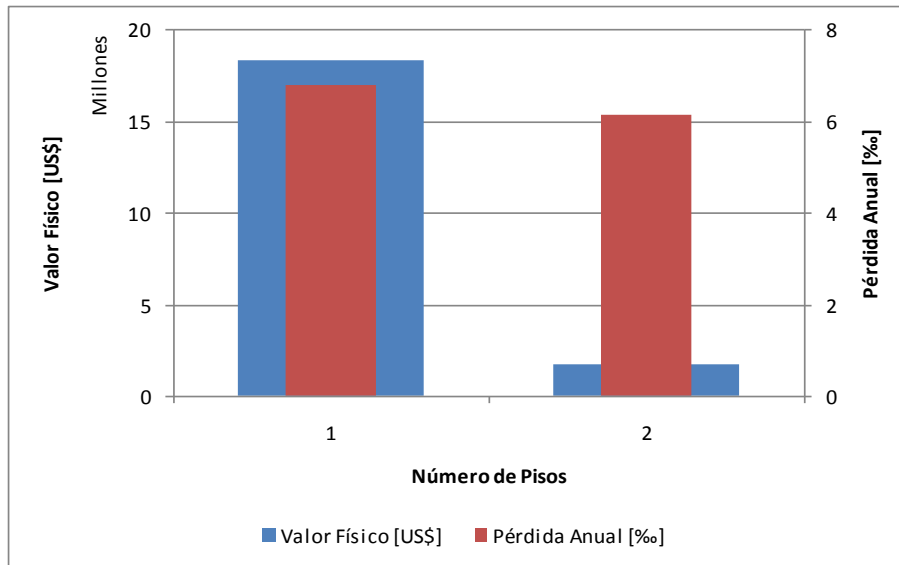
**Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)**

Sistema	Valor Expuesto		Pérdida Anual Esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[%]
MC-FLSB-2	2,731,309	13.62%	6,921	2.53‰
MS-SLSB-1	1,367,936	6.82%	6,927	5.06‰
PCR-SLSB-1	2,402,417	11.98%	12,173	5.07‰
W-SLFB-1	13,555,538	67.58%	109,155	8.05‰
<b>Totales</b>	<b>20,057,200</b>	<b>100%</b>	<b>135,176</b>	<b>6.74‰</b>



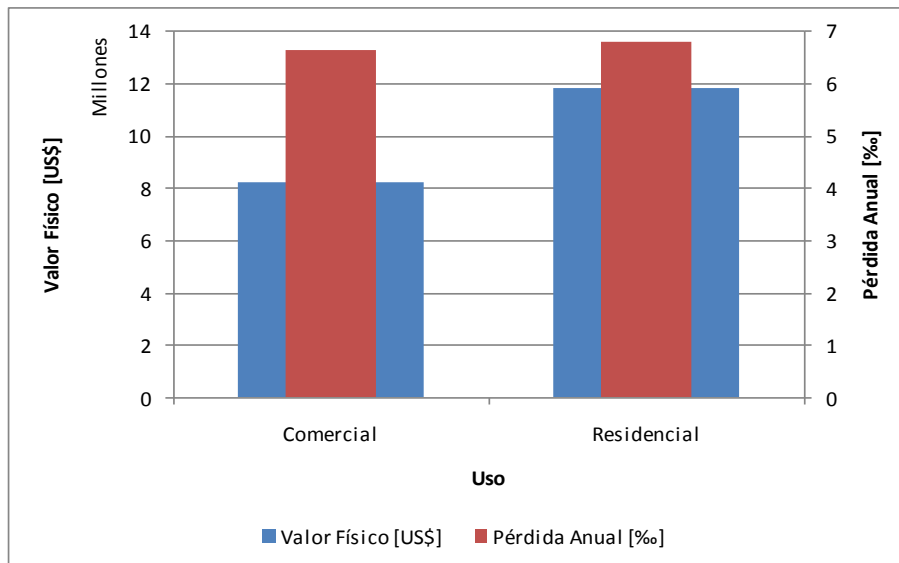
**Figura 195**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



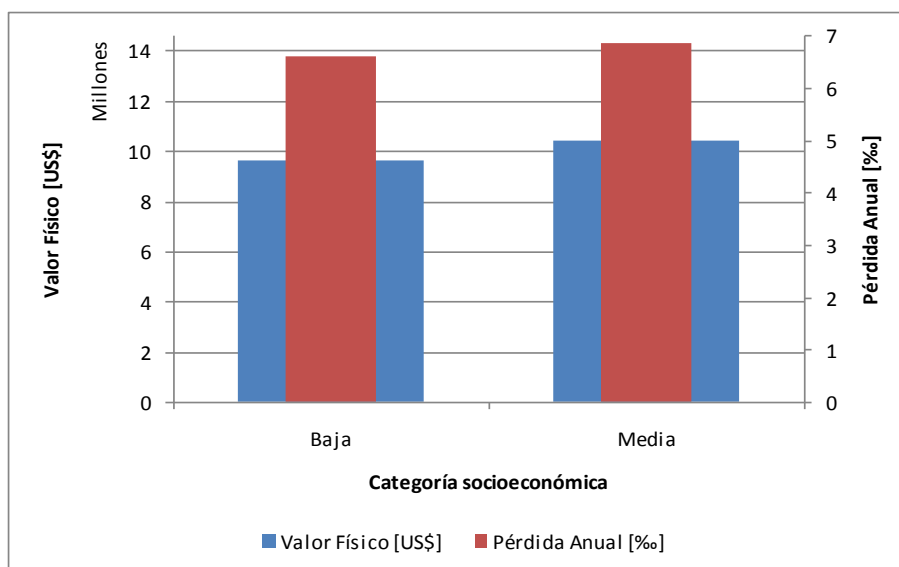
**Figura 196**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 197**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



**Figura 198**

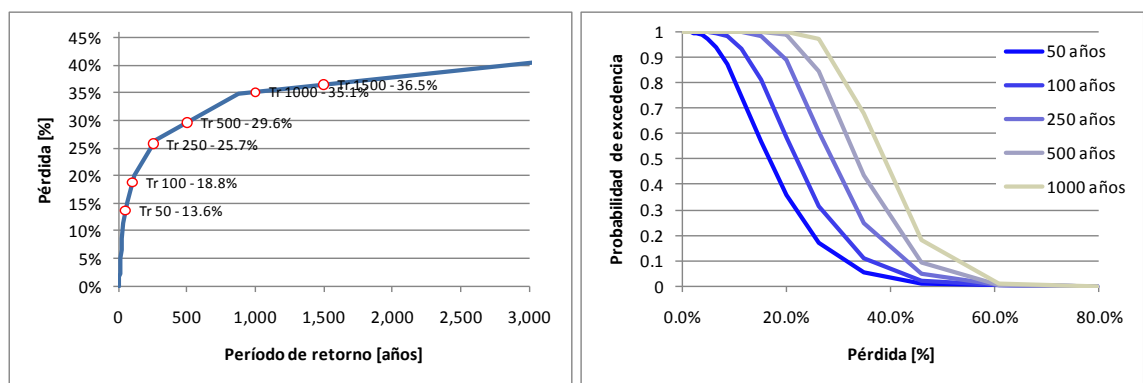
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socioeconómica

## 12.2 Resultados de riesgo por viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 43**

**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>6</sup>	20.06
Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>6</sup>	0.25
Esperada	‰	12.22‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x 10 <sup>6</sup>	%
50	2.74	13.6%
100	3.77	18.8%
250	5.16	25.7%
500	5.94	29.6%
1,000	7.05	35.1%
1,500	7.31	36.5%



**Figura199**

Resultados análisis

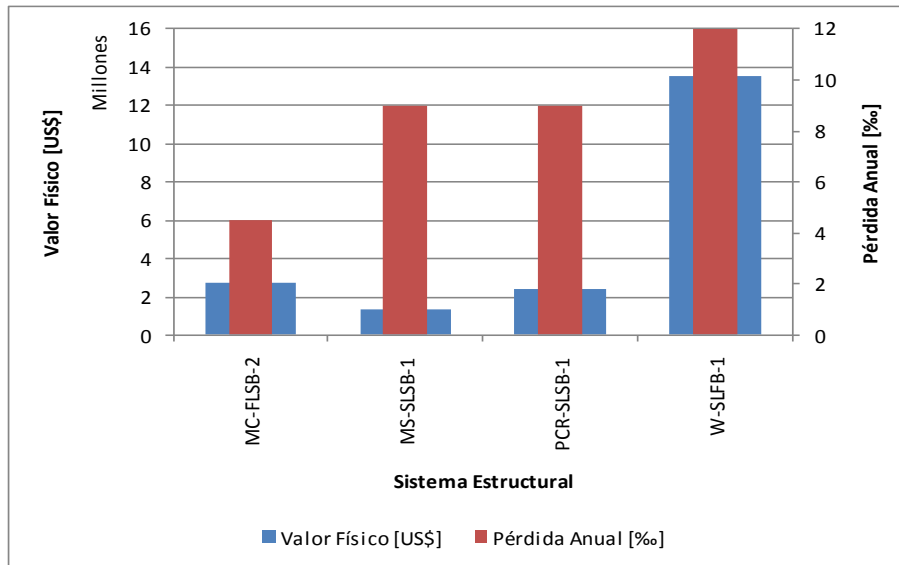
(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

**Tabla 44**

**Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)**

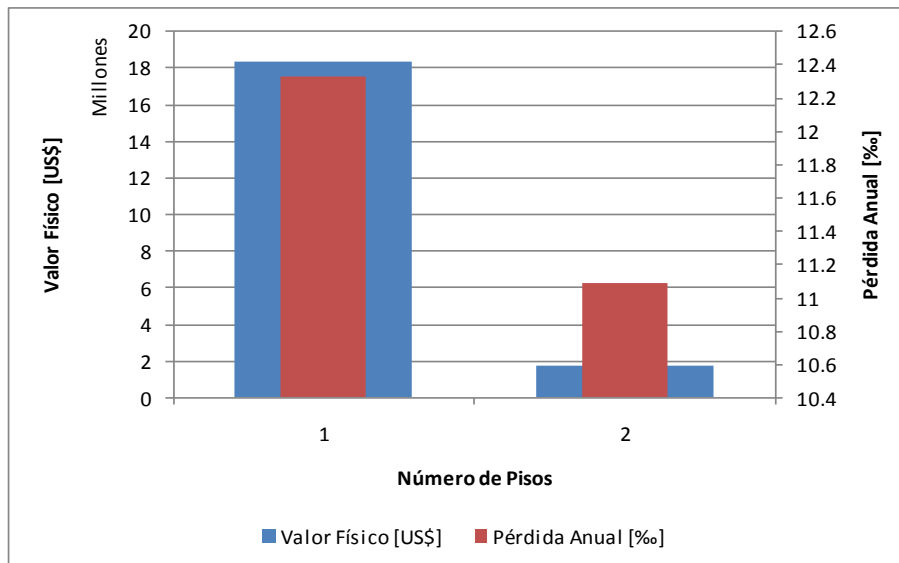
Sistema	Valor Expuesto		Pérdida Anual Esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[%o]
MC-FLSB-2	2,731,309	13.62%	12,250	4.48‰
MS-SLSB-1	1,367,936	6.82%	12,303	8.99‰
PCR-SLSB-1	2,402,417	11.98%	21,633	9‰
W-SLFB-1	13,555,538	67.58%	198,996	14.68‰
<b>Totales</b>	<b>20,057,200</b>	<b>100%</b>	<b>245,181</b>	<b>12.22‰</b>





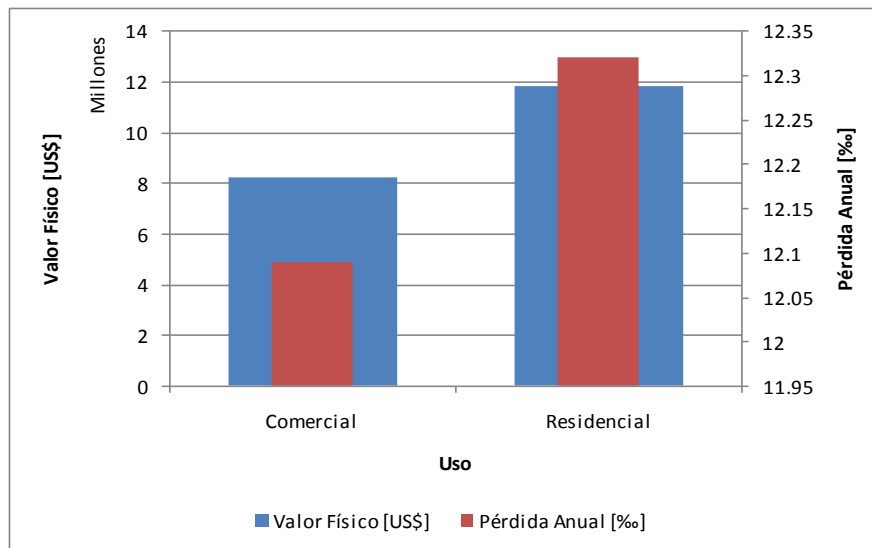
**Figura 200**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



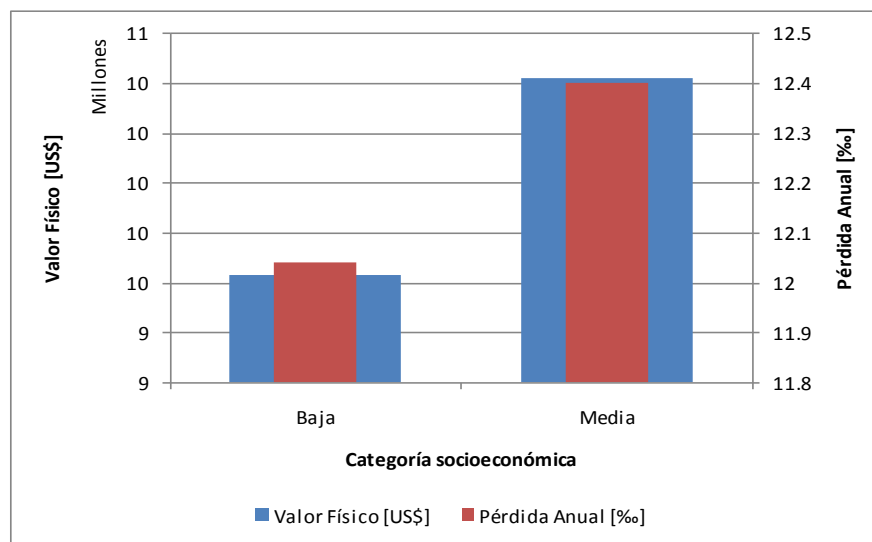
**Figura 201**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 202**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



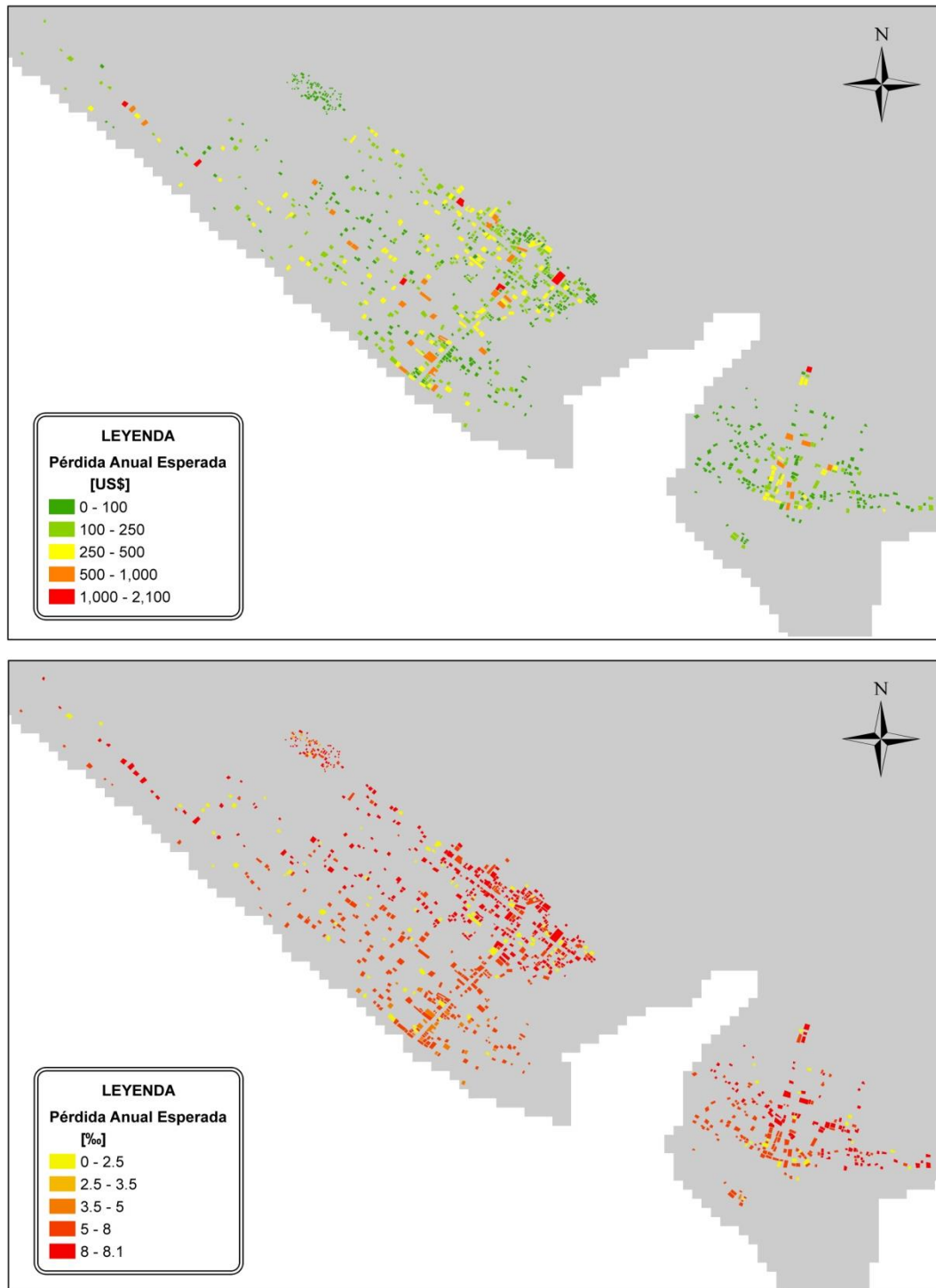
**Figura 203**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socioeconómica

### 12.3 Mapas de riesgo

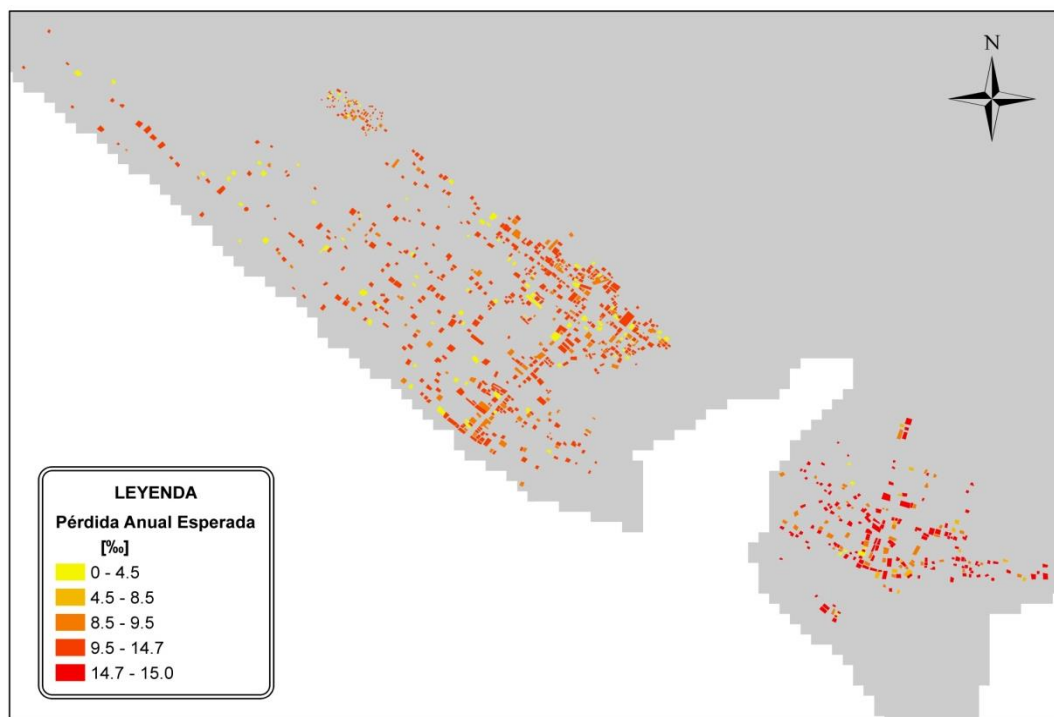
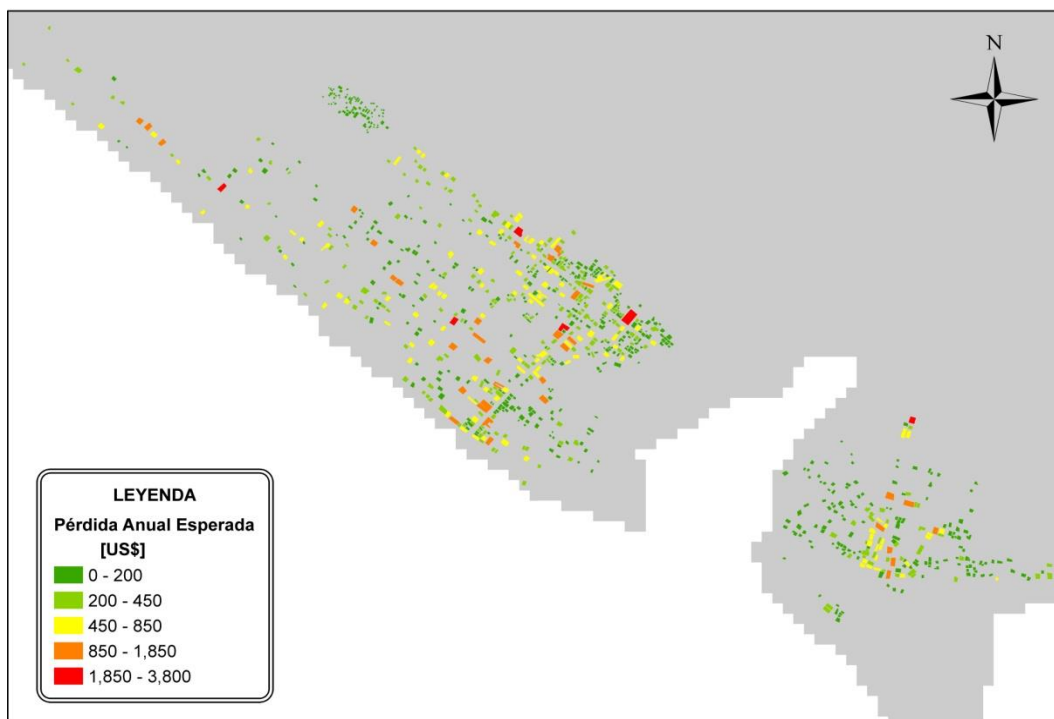
La información anterior se puede visualizar mediante mapas de riesgo. La Figura 204 presenta la distribución geográfica de la pérdida anual esperada por predio para viento huracanado sin el efecto del cambio climático. Los resultados se presentan al millar del valor expuesto y en valor

económico. La Figura 205 presenta los resultados equivalentes para viento huracanado con el efecto del cambio climático.



**Figura 204**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado sin cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)



**Figura 205**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado con cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)

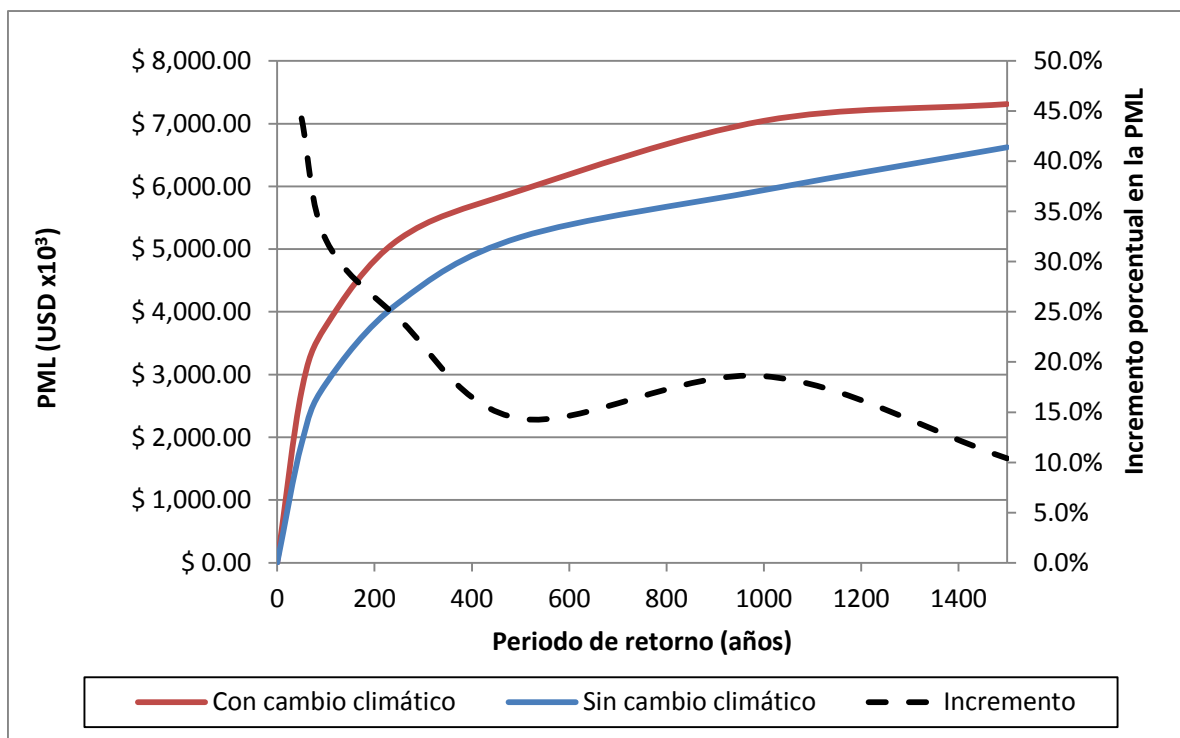
## 12.4 Comparación de resultados

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de riesgo con y sin cambio climático. Se presenta adicionalmente el incremento porcentual en la Pérdida anual esperada y en los valores de Pérdida máxima probable (PML) para los periodos de retorno seleccionados. De los resultados presentados es posible ver como la pérdida anual esperada presenta un incremento de más del 80% al incorporar en el análisis el impacto del cambio climático. Por otra parte, los valores de PML presentan incrementos entre el 45% y el 10 %, con una variación inversa con relación al periodo de retorno.

En la Figura 206 se presentan de manera gráfica los resultados asociados a la PML.

**Tabla 45**  
**Comparación de resultados generales**

Con cambio climático			Sin cambio climático			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	20,057	Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	20,057	81.4%
Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>3</sup>	245.181	Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>6</sup>	135.176	
Esperada	‰	12.2‰	Esperada	‰	6.7‰	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		PML
años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	
50	2,737.42	13.6%	50	1,897.19	9.5%	
100	3,774.27	18.8%	100	2,855.29	14.2%	
250	5,156.47	25.7%	250	4,148.09	20.7%	
500	5,937.10	29.6%	500	5,191.65	25.9%	
1,000	7,045.62	35.1%	1,000	5,940.91	29.6%	
1,500	7,312.80	36.5%	1,500	6,624.02	33.0%	



**Figura 206**  
Curvas de PML y su incremento porcentual

### 13. ANÁLISIS DE RIESGO PARA ZACAPA

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas económicas por vientos huracanados para Zacapa. El riesgo fue calculado tanto para condiciones actuales de amenaza como incorporando el impacto asociado al cambio climático. La metodología aplicada para el cálculo probabilista de riesgo se presenta en el Anexo 3.

Zacapa, capital del departamento con el mismo nombre, está localizada a 115 kilómetros al noreste de la capital de Guatemala, y tiene una población de aproximadamente 31,400 habitantes con una extensión territorial de 6.3km<sup>2</sup>. La población cuenta con cerca de 7,870 edificaciones, predominantemente de uso residencial y poca altura, construidas principalmente en mampostería simple.



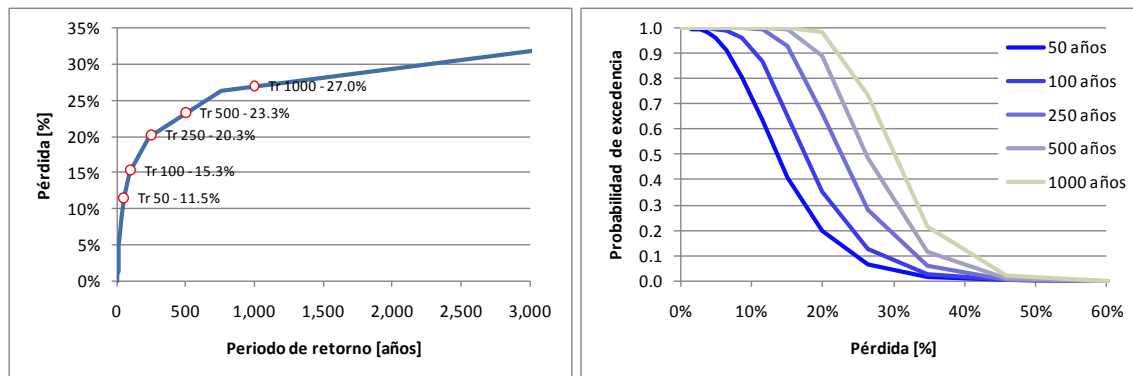
**Figura 207**

Localización geográfica de Zacapa

### 13.1 Resultados de riesgo por viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 46**  
**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	348.17
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 <sup>6</sup>	3.39
	‰	9.73‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50	40.07	11.51%
100	53.30	15.31%
250	70.51	20.25%
500	81.00	23.26%
1,000	93.88	26.96%



**Figura 208**

Resultados análisis

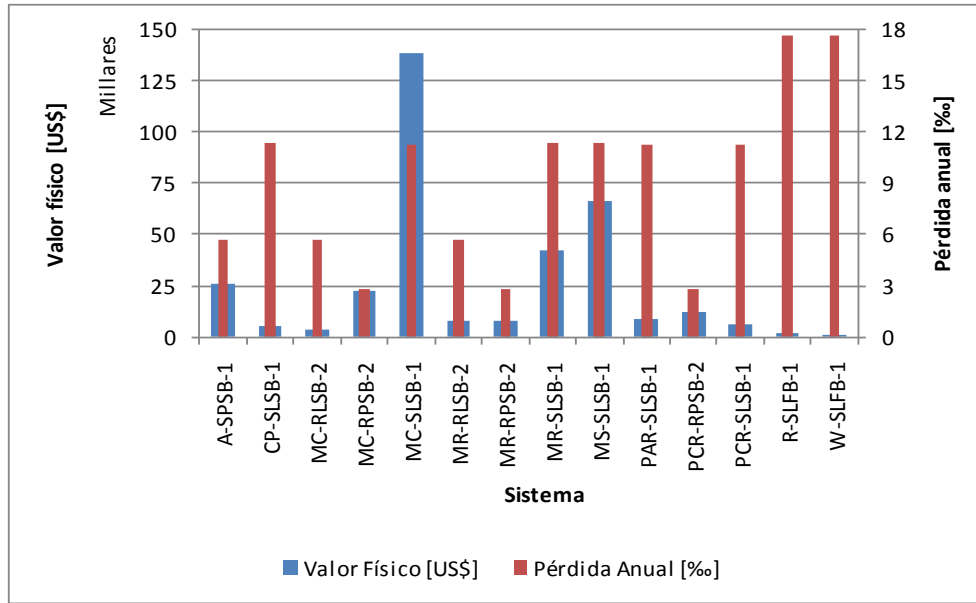
(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)



**Tabla 47**

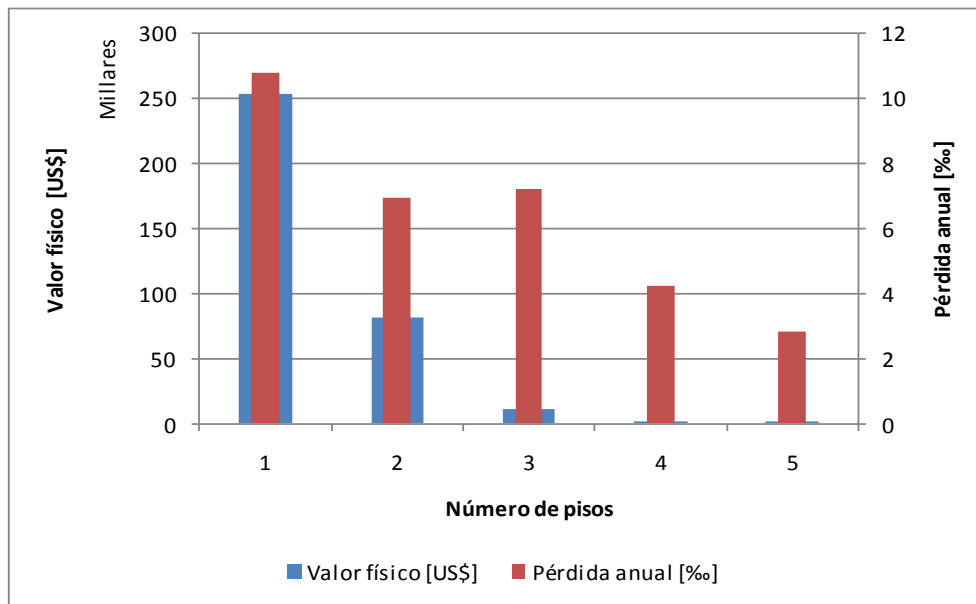
**Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)**

Sistema	Valor expuesto		Pérdida anual esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[‰]
A-SPSB-1	25,715,220	7.40%	145,519	5.66‰
CP-SLSB-1	4,929,524	1.40%	55,858	11.33‰
MC-RLSB-2	3,270,800	0.90%	18,530	5.67‰
MC-RPSB-2	22,297,752	6.40%	62,856	2.82‰
MC-SLSB-1	138,689,349	39.80%	1,562,323	11.26‰
MR-RLSB-2	7,917,240	2.30%	44,658	5.64‰
MR-RPSB-2	7,739,922	2.20%	21,822	2.82‰
MR-SLSB-1	42,579,560	12.20%	482,037	11.32‰
MS-SLSB-1	66,121,092	19.00%	748,435	11.32‰
PAR-SLSB-1	8,257,944	2.40%	92,840	11.24‰
PCR-RPSB-2	11,703,140	3.40%	33,077	2.83‰
PCR-SLSB-1	6,010,467	1.70%	67,471	11.23‰
R-SLFB-1	1,654,168	0.50%	29,210	17.66‰
W-SLFB-1	1,284,792	0.40%	22,687	17.66‰
<b>Total</b>	<b>348,170,970</b>	<b>100.00%</b>	<b>3,387,324</b>	<b>9.73‰</b>



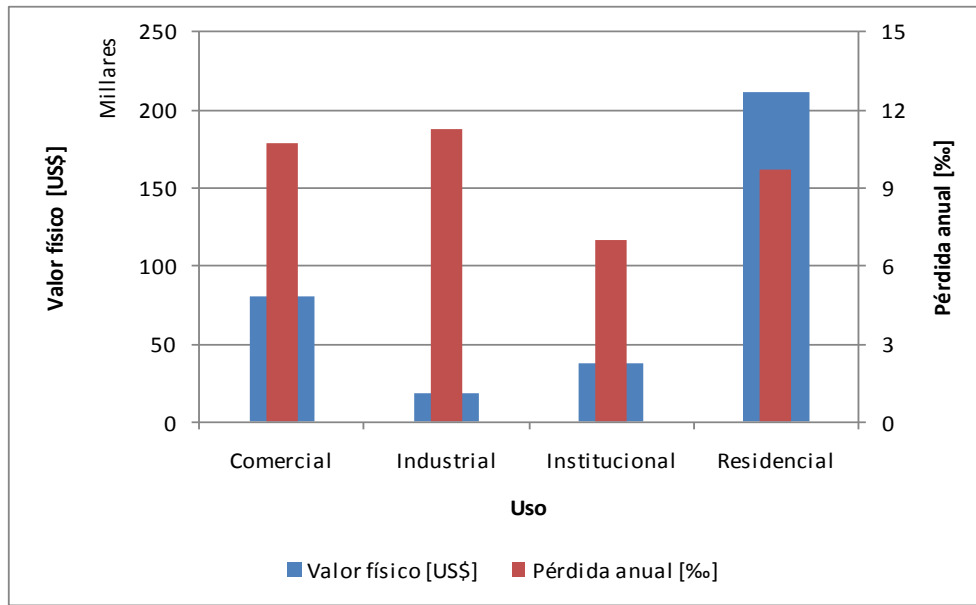
**Figura 209**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



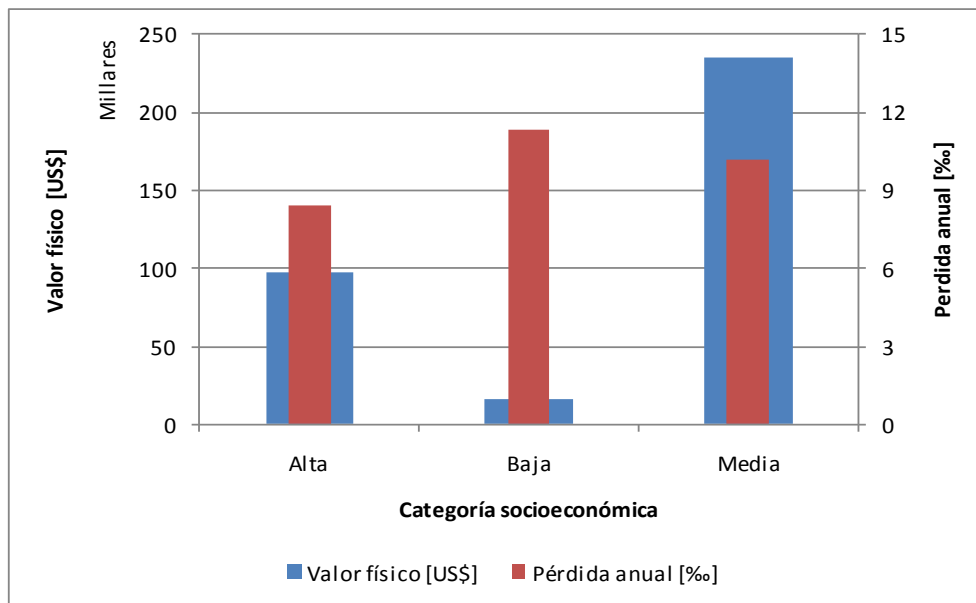
**Figura 210**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 211**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



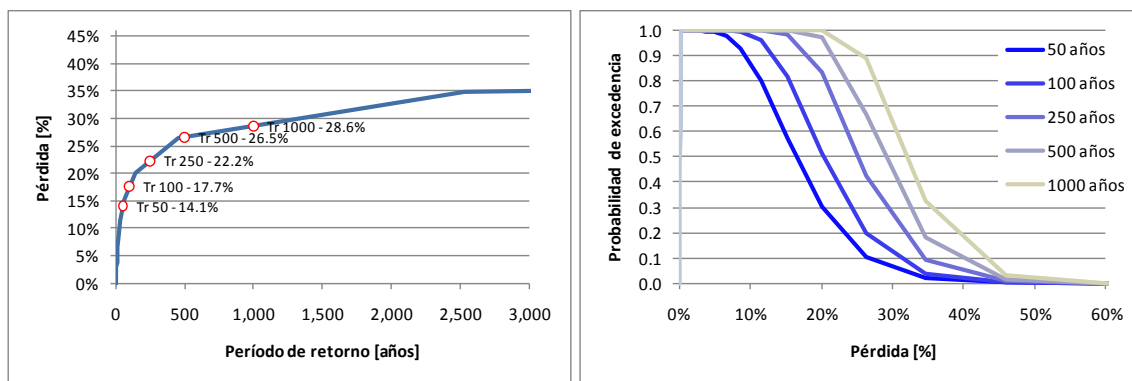
**Figura 212**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica

## 13.2 Resultados para viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 48**  
**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	348.17
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 <sup>6</sup>	5.43
	‰	15.59‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50	48.92	14.05%
100	61.59	17.69%
250	77.47	22.25%
500	92.44	26.55%
1,000	99.47	28.57%



**Figura 213**

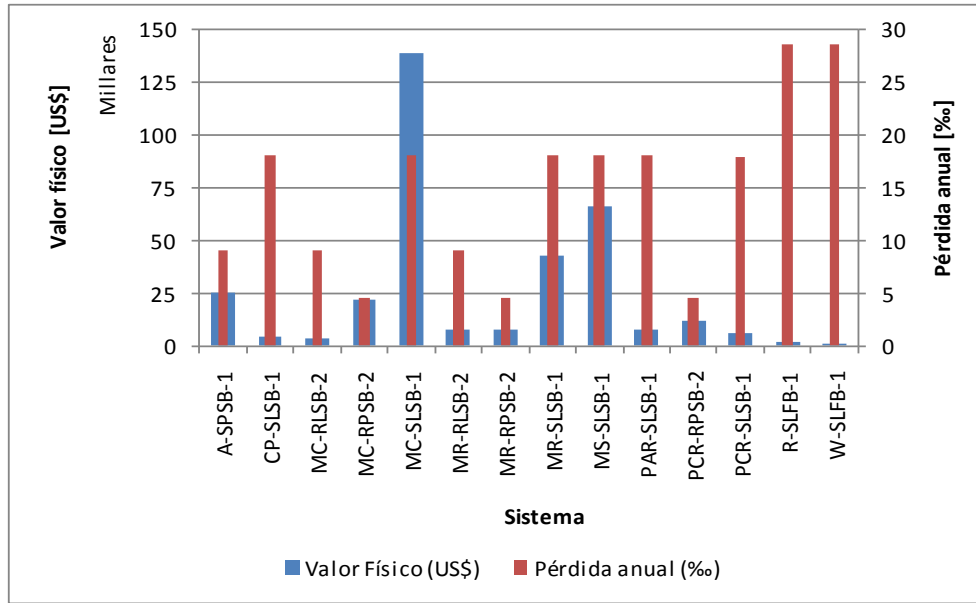
Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes periodos de exposición)

**Tabla 49**

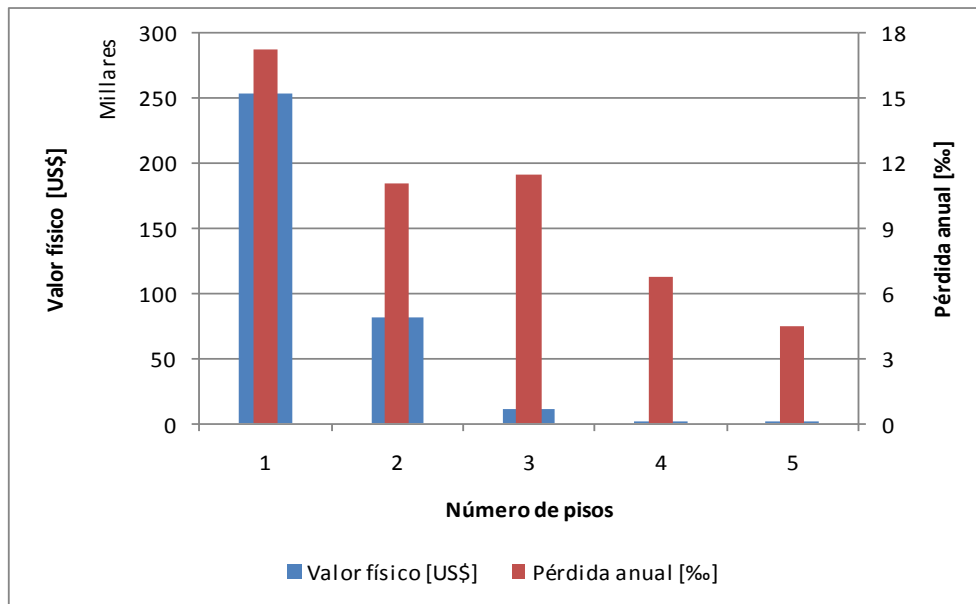
**Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)**

Sistema	Valor expuesto		Pérdida anual esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[%]
A-SPSB-1	25,715,220	7.40%	232,899	9.06‰
CP-SLSB-1	4,929,524	1.40%	89,400	18.14‰
MC-RLSB-2	3,270,800	0.90%	29,611	9.05‰
MC-RPSB-2	22,297,752	6.40%	100,812	4.52‰
MC-SLSB-1	138,689,349	39.80%	2,504,649	18.06‰
MR-RLSB-2	7,917,240	2.30%	71,437	9.02‰
MR-RPSB-2	7,739,922	2.20%	34,992	4.52‰
MR-SLSB-1	42,579,560	12.20%	771,193	18.11‰
MS-SLSB-1	66,121,092	19.00%	1,197,678	18.11‰
PAR-SLSB-1	8,257,944	2.40%	148,902	18.03‰
PCR-RPSB-2	11,703,140	3.40%	52,907	4.52‰
PCR-SLSB-1	6,010,467	1.70%	108,314	18.02‰
R-SLFB-1	1,654,168	0.50%	47,358	28.63‰
W-SLFB-1	1,284,792	0.40%	36,786	28.63‰
<b>Total</b>	<b>348,170,970</b>	<b>100.00%</b>	<b>5,426,938</b>	<b>15.59‰</b>



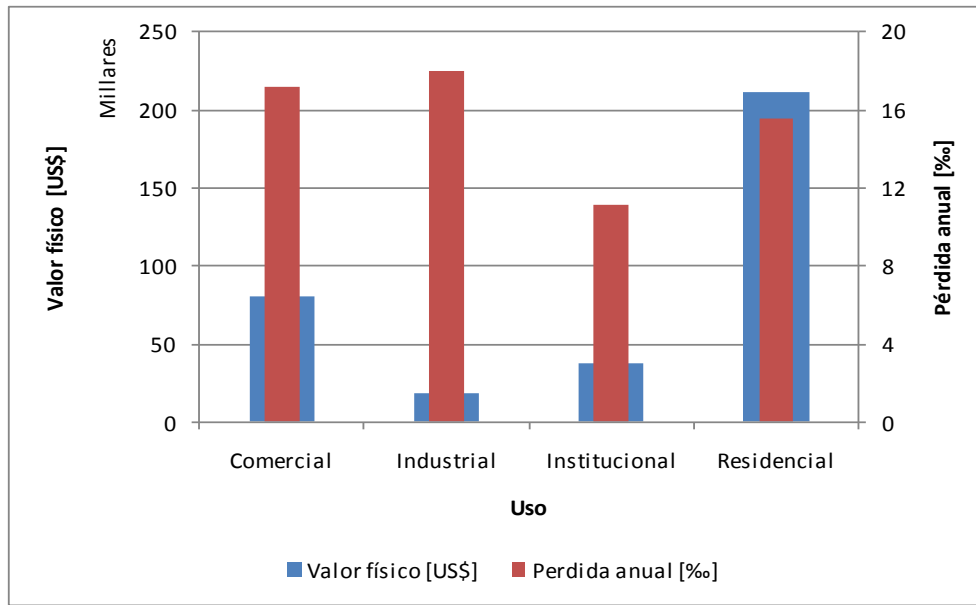
**Figura 214**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



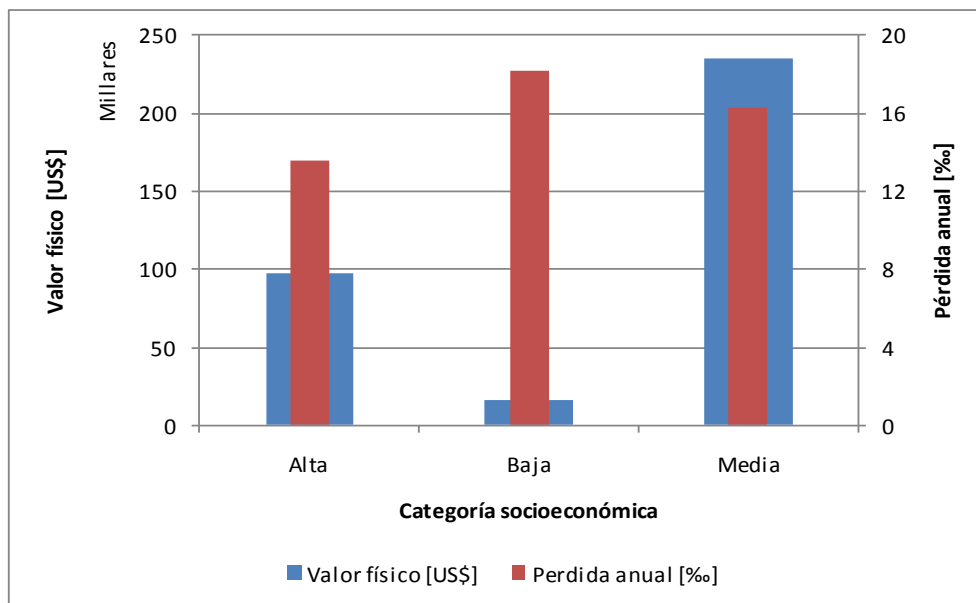
**Figura 215**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 216**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



**Figura 217**

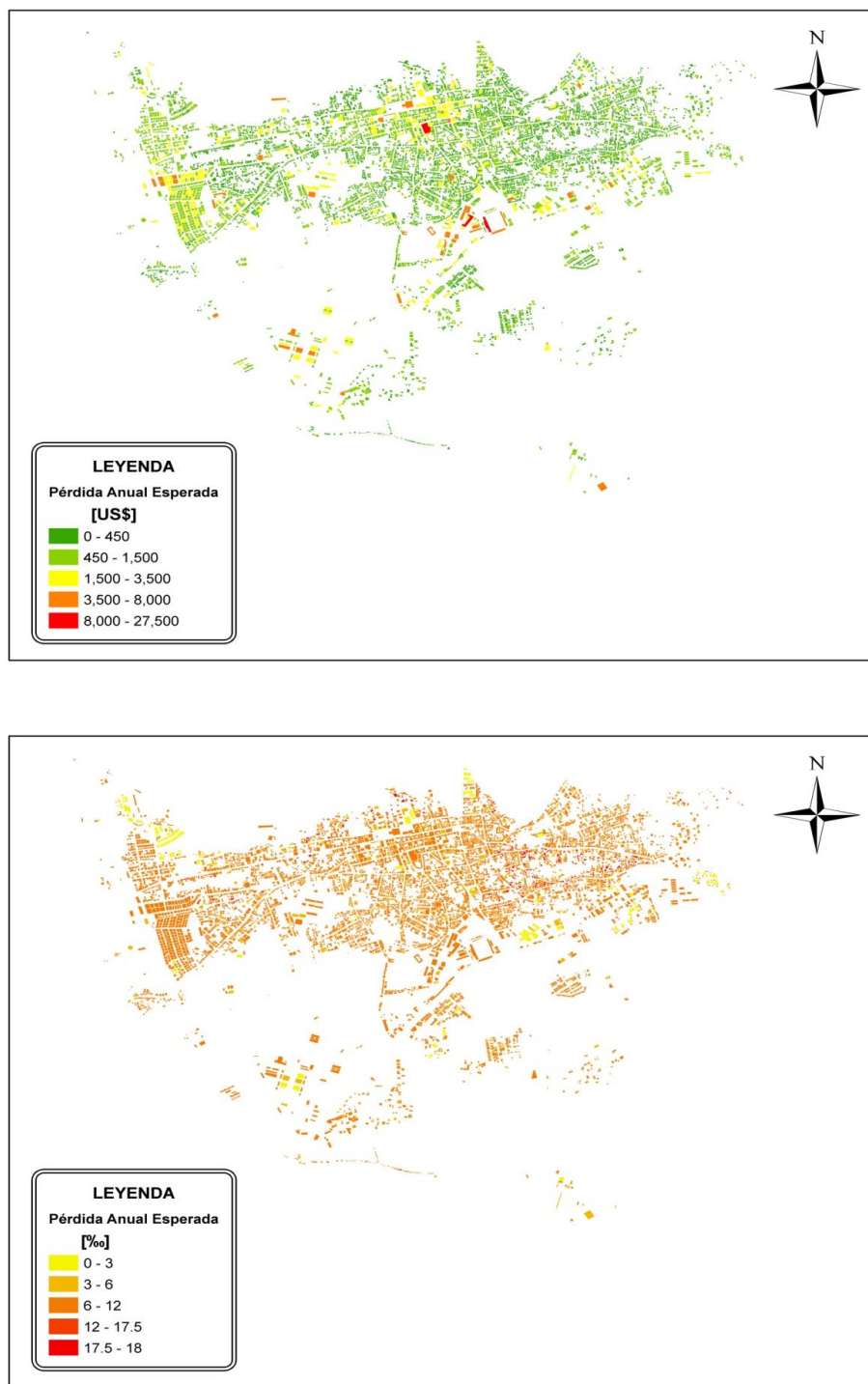
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica

### 13.3 Mapas de riesgo

La información anterior se puede visualizar mediante mapas de riesgo. La Figura 218 presenta la distribución geográfica de la pérdida anual esperada por predio para huracán sin incluir el efecto

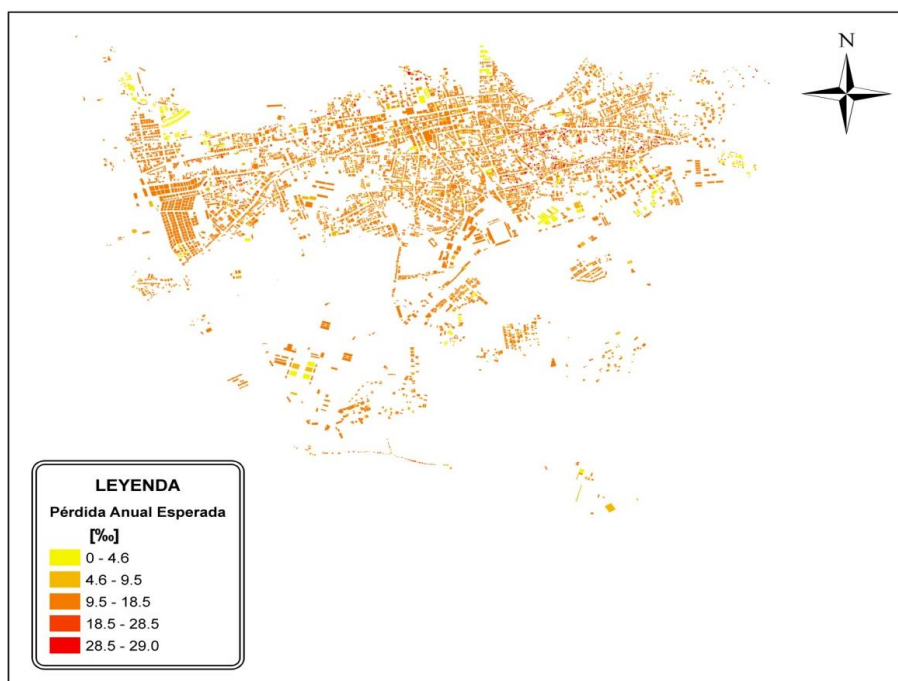
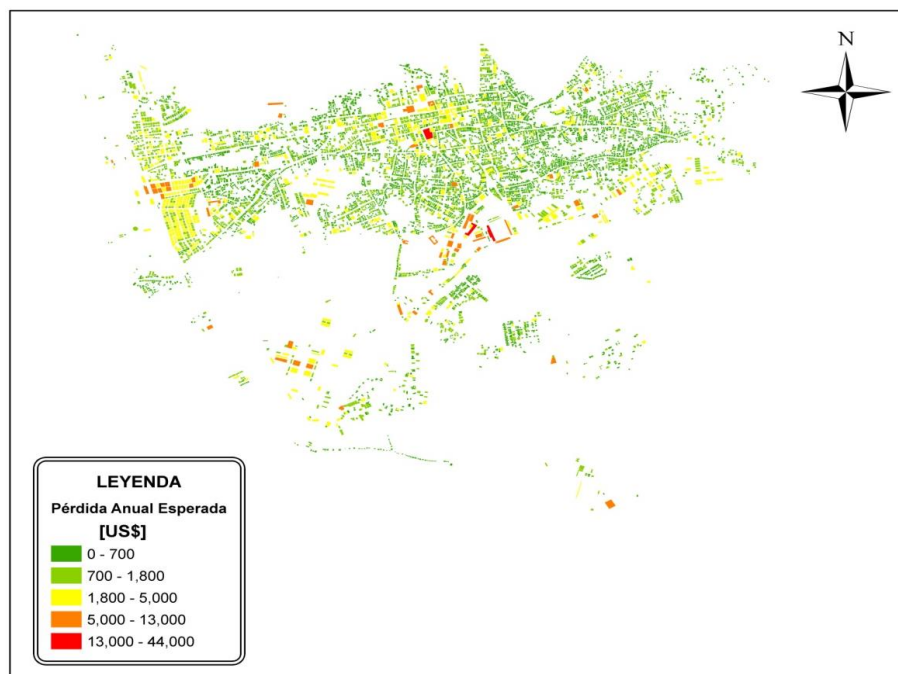
del cambio climático. Los resultados se presentan al millar del valor expuesto y en valor económico. La Figura 219 presenta los resultados equivalentes para viento huracanado incluyendo el efecto del cambio climático.





**Figura 218**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado sin cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)



**Figura 219**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado con cambio climático  
(Izquierda: en valor, US\$; derecha: al millar del valor expuesto)

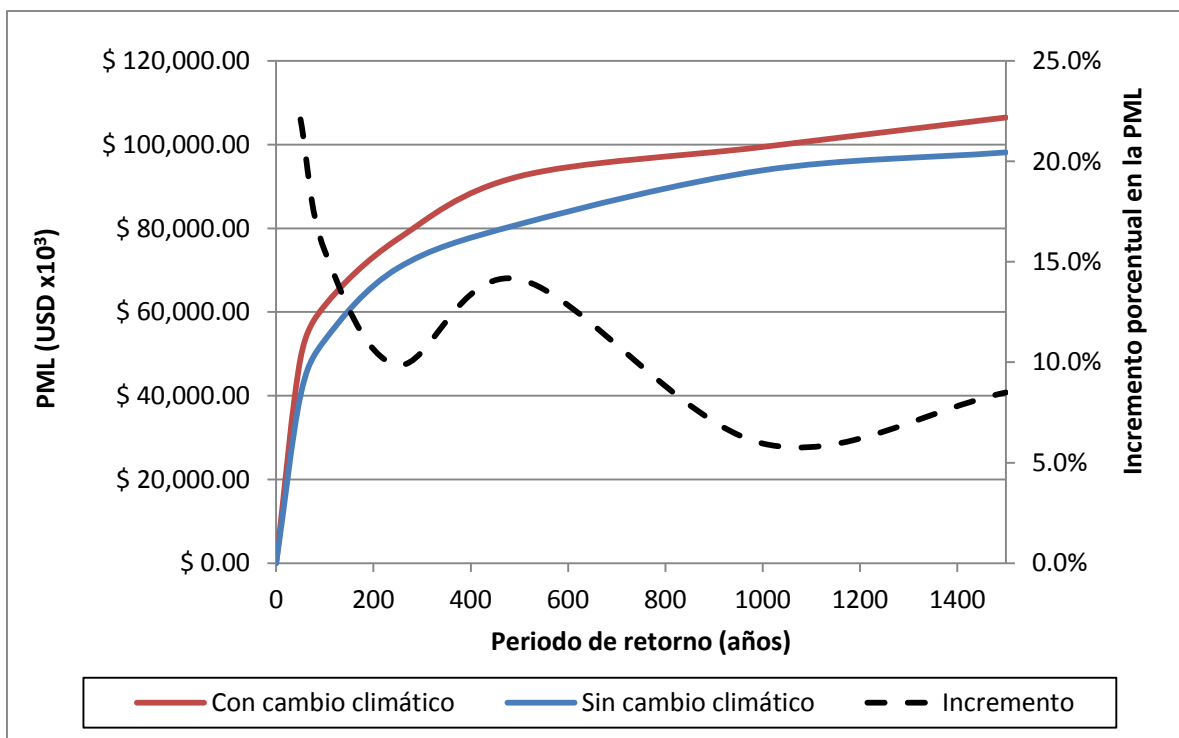
### 13.4 Comparación de resultados

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de riesgo con y sin cambio climático. Se presenta adicionalmente el incremento porcentual en la Pérdida anual esperada y en los valores de Pérdida máxima probable (PML) para los periodos de retorno seleccionados. De los resultados presentados es posible ver como la pérdida anual esperada presenta un incremento de más del 60% al incorporar en el análisis el impacto del cambio climático. Por otra parte, los valores de PML presentan incrementos entre el 22% y el 8%, con una variación inversa con relación al periodo de retorno.

En la Figura 206 se presentan de manera gráfica los resultados asociados a la PML.

**Tabla 50**  
**Comparación de resultados generales**

Con cambio climático			Sin cambio climático			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	348,171	Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	348,171	60.2%
Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>3</sup>	5,426.938	Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>6</sup>	3,387.324	
Esperada	‰	15.6‰	Esperada	‰	9.7‰	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		
años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	
50	48,923.20	14.1%	50	40,069.45	11.5%	22.1%
100	61,587.29	17.7%	100	53,304.75	15.3%	15.5%
250	77,466.52	22.2%	250	70,509.76	20.3%	9.9%
500	92,439.00	26.5%	500	80,996.00	23.3%	14.1%
1,000	99,468.03	28.6%	1,000	93,876.44	27.0%	6.0%
1,500	106,497.06	30.6%	1,500	98,159.11	28.2%	8.5%



**Figura 220**  
Curvas de PML y su incremento porcentual

#### 14. ANÁLISIS DE RIESGO PARA SANTIAGO DE ATITLÁN

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas económicas por vientos huracanados para Santiago de Atitlán. El riesgo fue calculado tanto para condiciones actuales de amenaza como incorporando el impacto asociado al cambio climático. La metodología aplicada para el cálculo probabilista de riesgo se presenta en el Anexo 3.

Santiago Atitlán es un municipio perteneciente al Departamento de Sololá, que limita al norte con el Lago Atitlán, al este con San Lucas Toliman (Sololá), al sur con Bárbara Suchitepéquez y al oeste con Chicacao y San Pedro La Laguna (Sololá). Tiene una extensión territorial de 136 km<sup>2</sup> (12.82% del total del departamento de Sololá) y se encuentra a 1,592 metros sobre el nivel del mar. La población cuenta con cerca de 2,200 edificaciones que en general corresponden a viviendas de 1 piso construidas principalmente en adobe, mampostería simple, mampostería confinada, pórticos de concreto y madera. Su población total es de 32,254 habitantes, según el censo INE de 2002<sup>4</sup>. El levantamiento realizado en este estudio corresponde a una porción de la ciudad, con una población estimada de 19,490 habitantes.



---

<sup>4</sup>Instituto Nacional de Estadística de Guatemala. <http://www.ine.gob.gt/>

Figura 221

Localización geográfica de Santiago de Atitlán

## 14.1 Resultados para viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático

Tabla 51

### Resultados generales

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	120.23
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 <sup>6</sup>	0.71
	‰	5.89‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50	9.59	7.98%
100	14.27	11.87%
250	20.53	17.07%
500	25.41	21.14%
1,000	30.92	25.72%

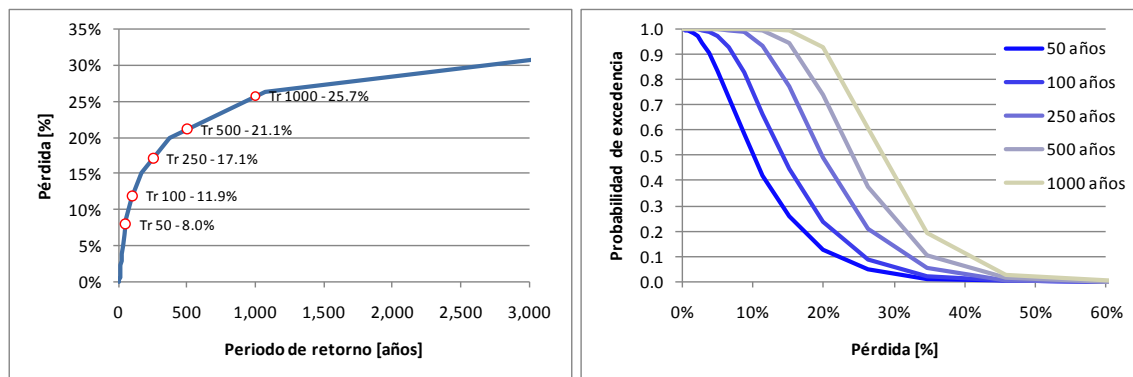


Figura 222

Resultados análisis

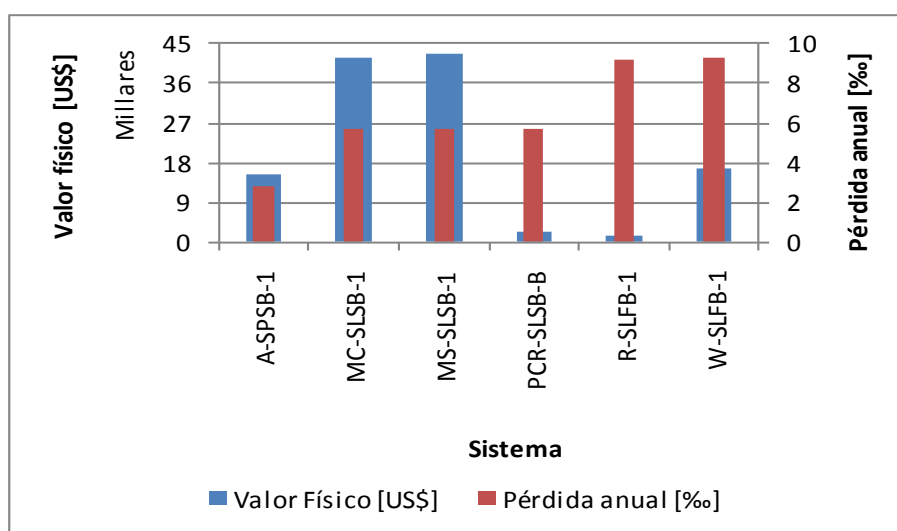
(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

Tabla 52

Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)

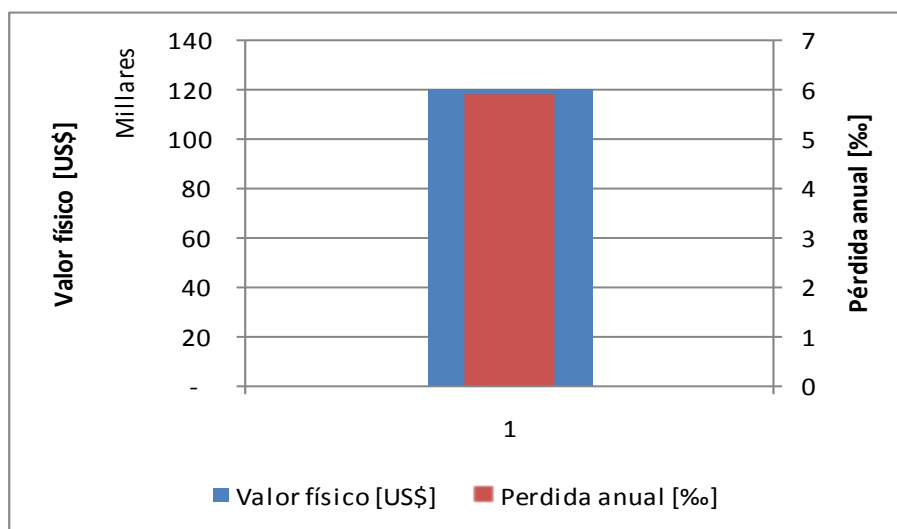
Sistema	Valor Expuesto	Pérdida Anual Esperada
---------	----------------	------------------------

	[US\$]	[%]	[US\$]	[%]
A-SPSB-1	15,371,002	12.78%	43,919	2.86‰
MC-SLSB-1	41,581,273	34.58%	237,888	5.72‰
MS-SLSB-1	42,472,794	35.33%	242,782	5.72‰
PCR-SLSB-B	2,511,020	2.09%	14,315	5.70‰
R-SLFB-1	1,581,210	1.32%	14,514	9.18‰
W-SLFB-1	16,712,534	13.90%	154,479	9.24‰
<b>Total</b>	<b>120,229,833</b>	<b>100%</b>	<b>707,897</b>	<b>5.89‰</b>



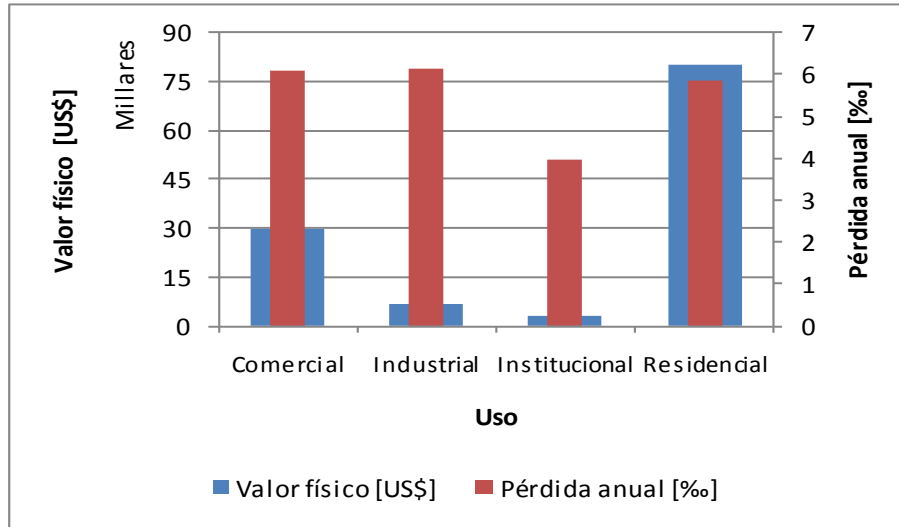
**Figura 223**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



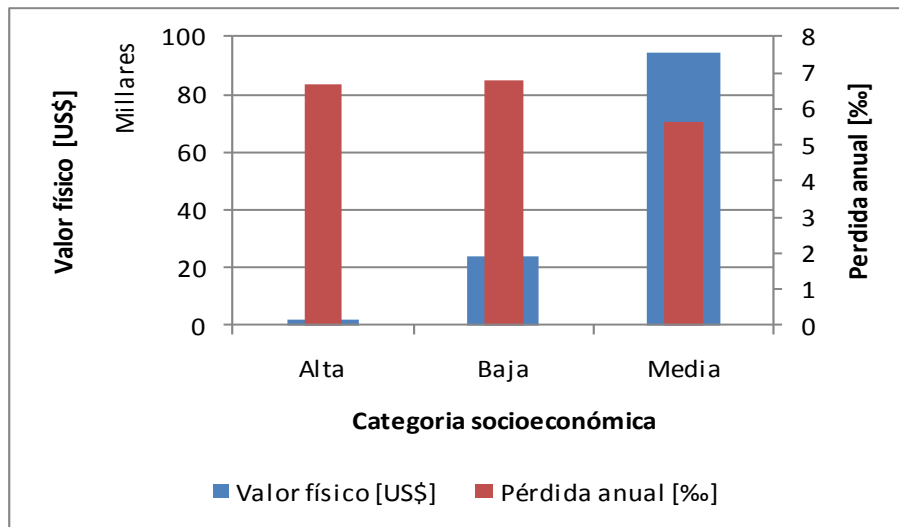
**Figura 224**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 225**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



**Figura 226**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica



## 14.2 Resultados para viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático

Tabla 53

### Resultados generales

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x10 <sup>6</sup>	120.23
Pérdida Anual Esperada	US\$ x10 <sup>6</sup>	1.43
	‰	11.87‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x10 <sup>6</sup>	%
50	14.93	12.42%
100	19.90	16.55%
250	26.30	21.87%
500	31.97	26.59%
1,000	35.26	29.32%

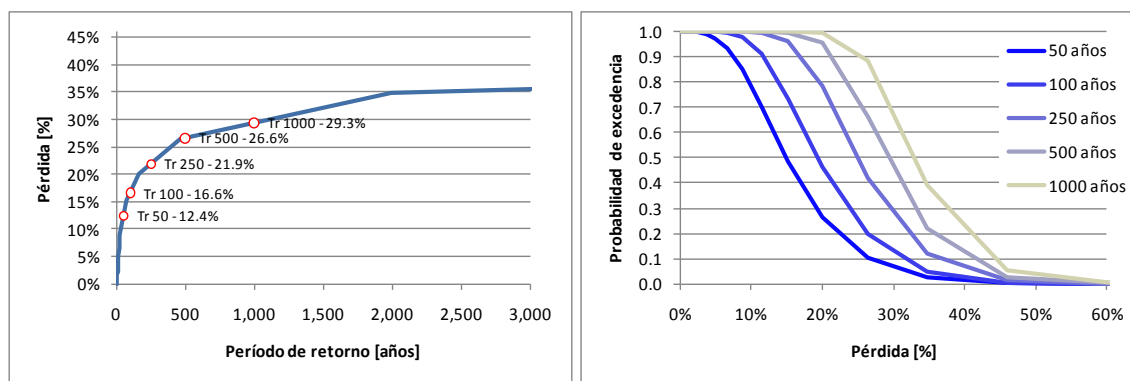


Figura 227

### Resultados análisis

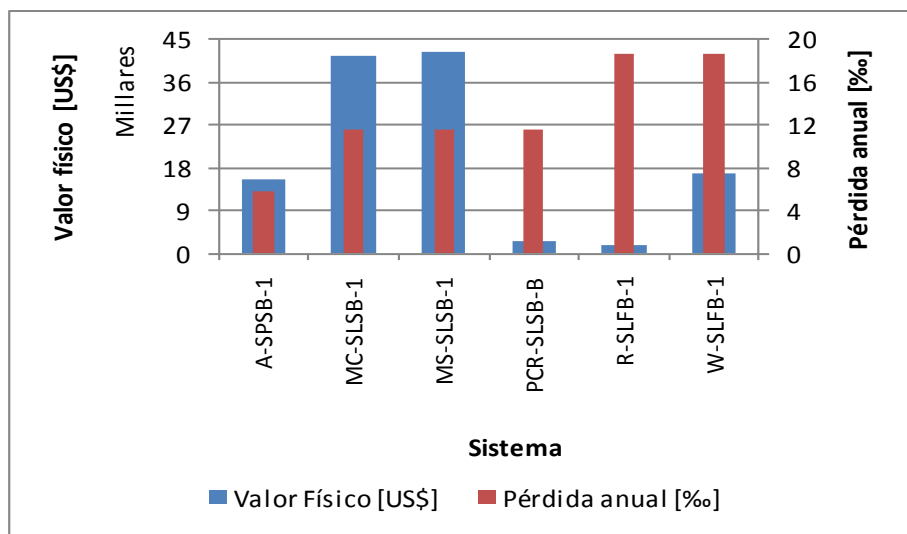
(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

Tabla 54

### Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)

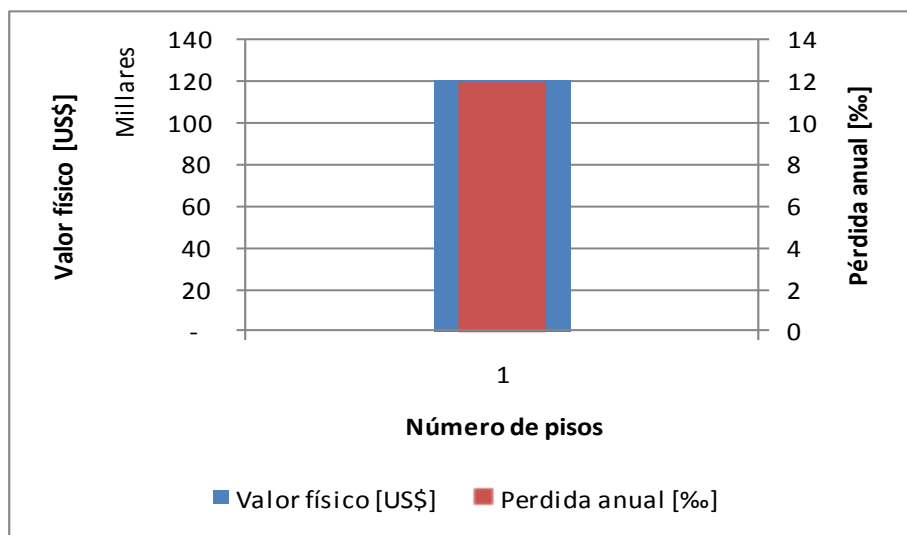
Sistema	Valor Expuesto		Pérdida Anual Esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[%]
A-SPSB-1	15,371,002	12.80%	88,558.76	5.8‰

MC-SLSB-1	41,581,273	34.60%	479,227.66	11.5‰
MS-SLSB-1	42,472,794	35.30%	489,548.75	11.5‰
PCR-SLSB-B	2,511,020	2.10%	28,961.58	11.5‰
R-SLFB-1	1,581,210	1.30%	29,456.88	18.6‰
W-SLFB-1	16,712,533	13.90%	311,327.67	18.6‰
<b>Total</b>	<b>120,229,833</b>	<b>100.00%</b>	<b>1,427,081.29</b>	<b>11.9‰</b>



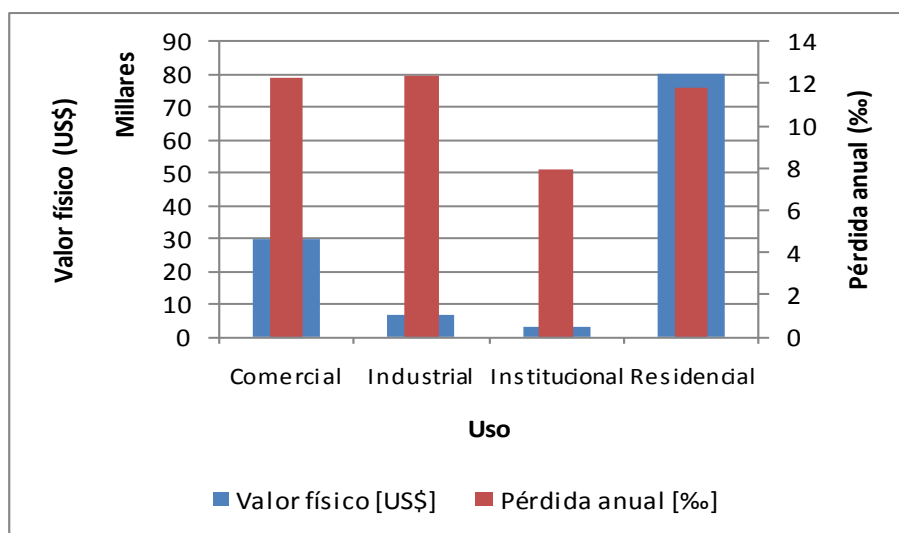
**Figura 228**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



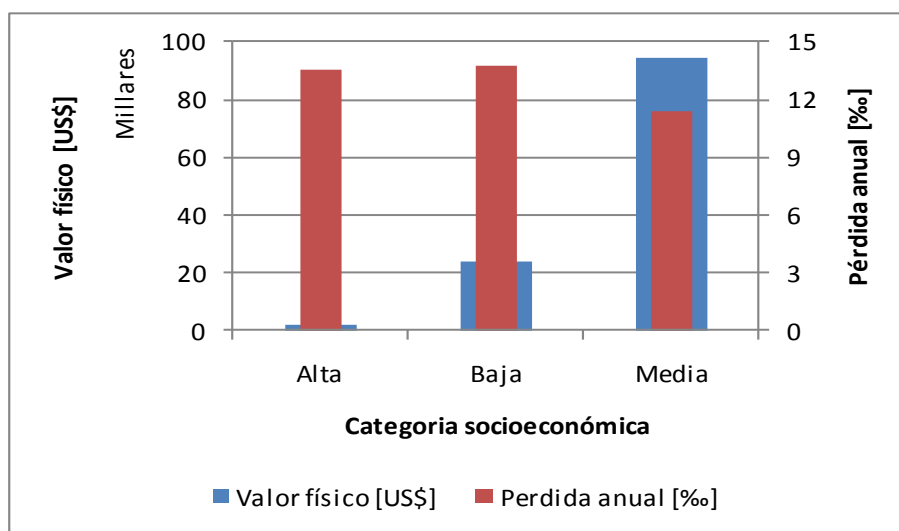
**Figura 229**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 230**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



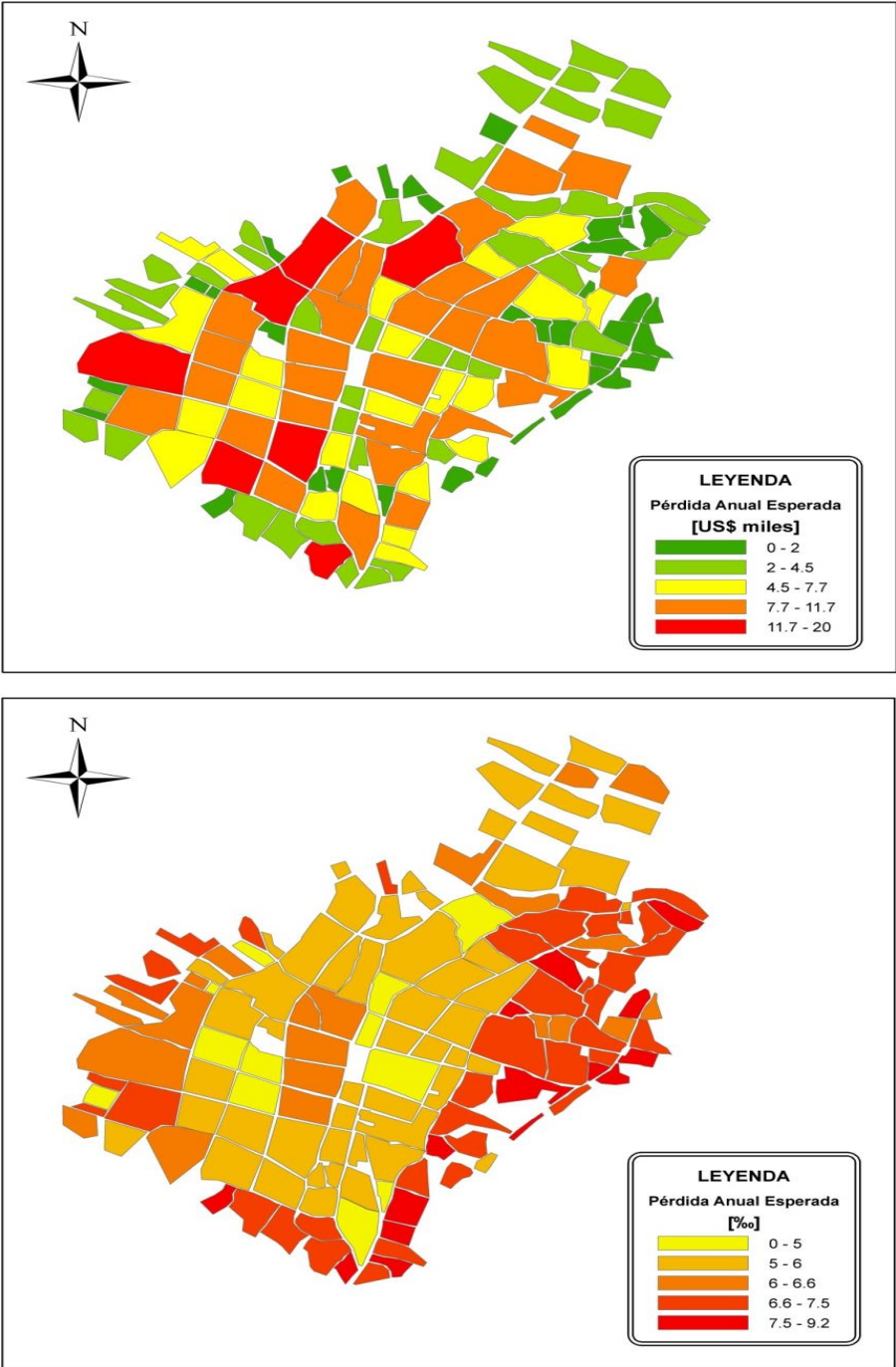
**Figura 231**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica

### 14.3 Mapas de riesgo

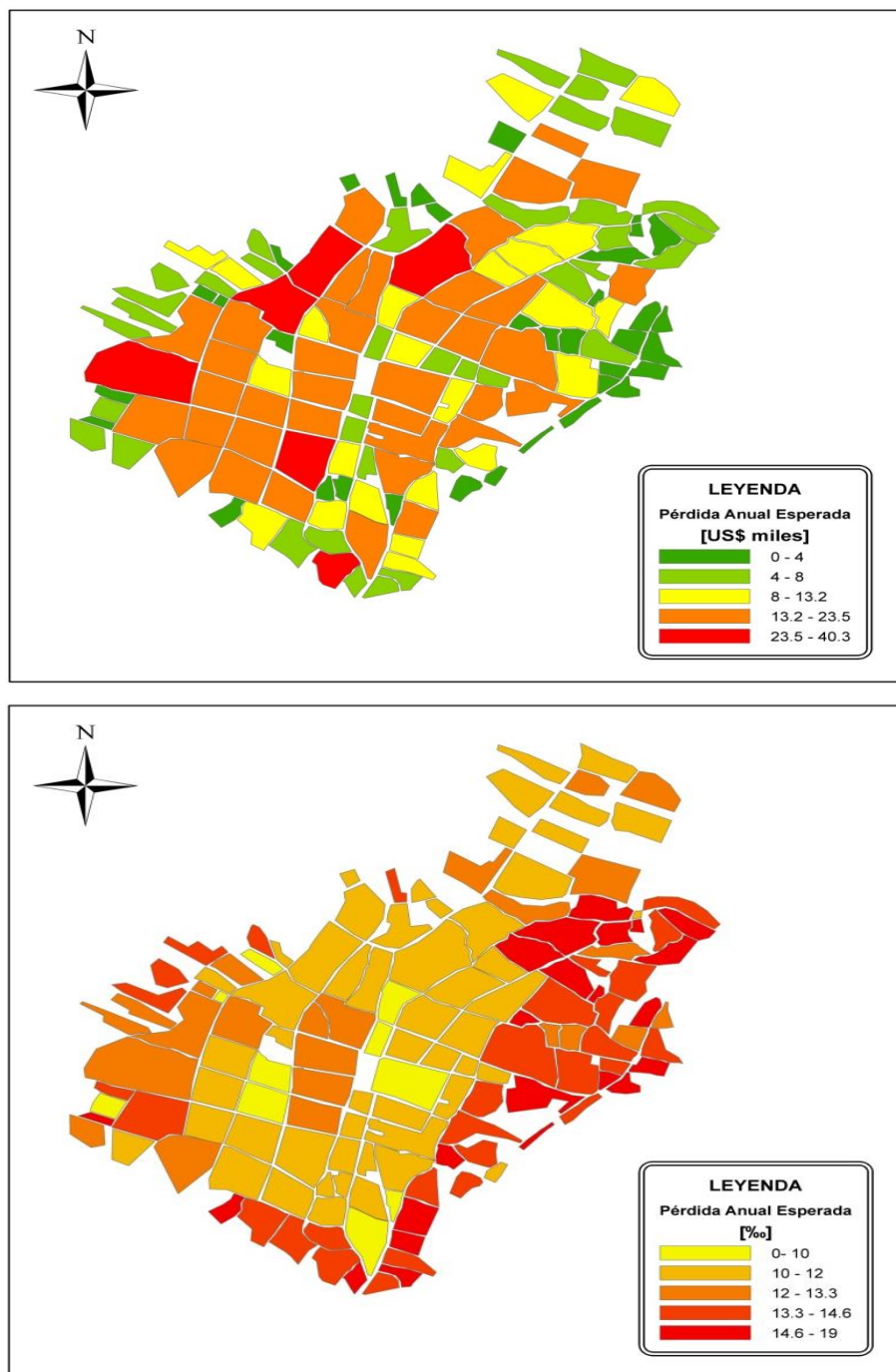
La información anterior se puede visualizar mediante mapas de riesgo, en los cuales se presenta la distribución geográfica de la pérdida anual esperada para cada elemento expuesto. Los

resultados se presentan al millar del valor de reposición y en valor económico. Los mapas de riesgo de Santiago Atitlán se presentan a continuación.



**Figura 232**

Pérdida anual esperada por manzana para viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático  
(Arriba: en valor, \$US\$; abajo: al millar del valor expuesto)



**Figura 233**

Pérdida anual esperada por manzana para viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático  
(Arriba: en valor, \$US\$; abajo: al millar del valor expuesto)

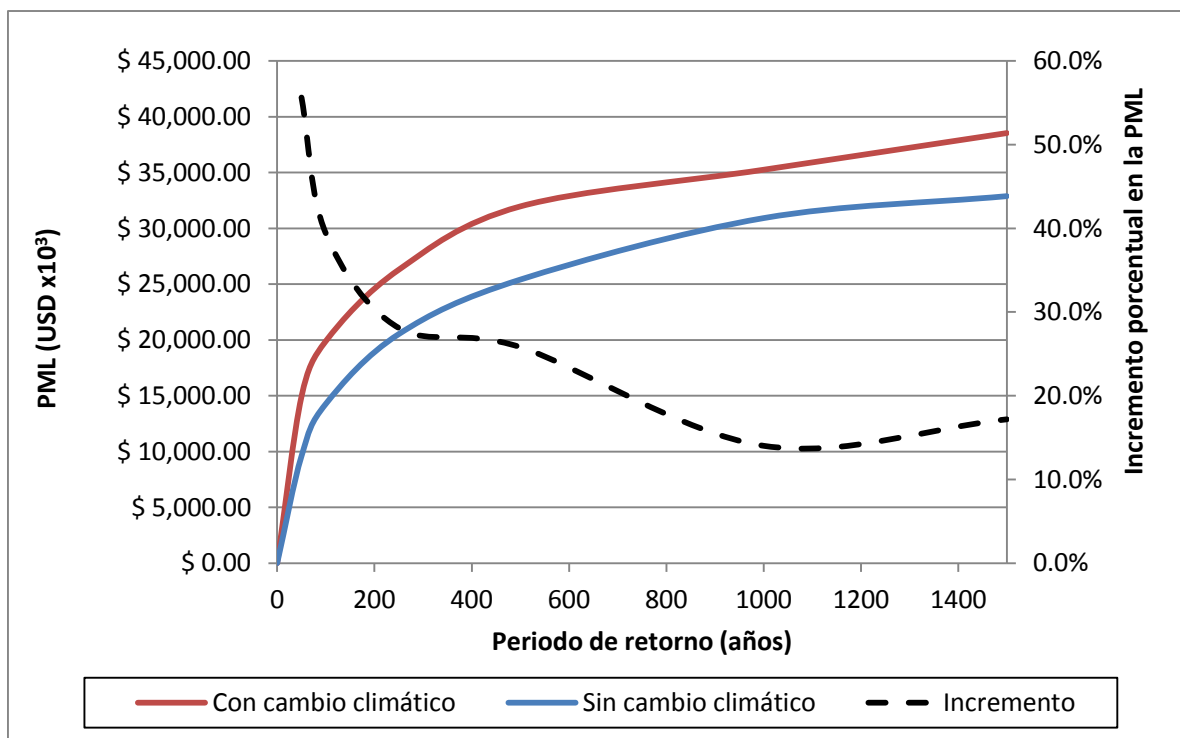
## 14.4 Comparación de resultados

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de riesgo con y sin cambio climático. Se presenta adicionalmente el incremento porcentual en la Pérdida anual esperada y en los valores de Pérdida máxima probable (PML) para los periodos de retorno seleccionados. De los resultados presentados es posible ver como la pérdida anual esperada presenta un incremento de más del 100% al incorporar en el análisis el impacto del cambio climático. Por otra parte, los valores de PML presentan incrementos entre el 55% y el 17%, con una variación inversa con relación al periodo de retorno.

En la Figura 234 se presentan de manera gráfica los resultados asociados a la PML.

**Tabla 55**  
**Comparación de resultados generales**

Con cambio climático			Sin cambio climático			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	120,230	Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	120,230	101.6%
Pérdida Anual Esperada	US\$ x 10 <sup>3</sup>	1,427.081	Pérdida Anual Esperada	US\$ x 10 <sup>6</sup>	707.897	
	‰	11.9‰		‰	5.9‰	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		
años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	
50	14,929.61	12.4%	50	9,592.65	8.0%	55.6%
100	19,898.11	16.6%	100	14,274.24	11.9%	39.4%
250	26,296.59	21.9%	250	20,528.30	17.1%	28.1%
500	31,971.24	26.6%	500	25,412.97	21.1%	25.8%
1,000	35,256.23	29.3%	1,000	30,921.49	25.7%	14.0%
1,500	38,541.23	32.1%	1,500	32,889.23	27.4%	17.2%



**Figura 234**

Curvas de PML y su incremento porcentual

## 15. ANÁLISIS DE RIESGO PARA LOS POCITOS

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas económicas por vientos huracanados para Los Pocitos. El riesgo fue calculado tanto para condiciones actuales de amenaza como incorporando el impacto asociado al cambio climático. La metodología aplicada para el cálculo probabilista de riesgo se presenta en el Anexo 3.

Los Pocitos es una aldea del municipio de Escuintla perteneciente al departamento con el mismo nombre. Está localizada en la ladera suroccidental del volcán Pacaya a 50 kilómetros al sur de la capital Ciudad de Guatemala. La población del casco urbano es de aproximadamente 1,240 habitantes y tiene una extensión de 0.2 km<sup>2</sup>. La población cuenta con cerca de 380 edificaciones, principalmente de uso residencial construidas principalmente en mampostería simple.



**Figura 235**

Localización geográfica de Los Pocitos



## 15.1 Resultados para viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático

Tabla 56

### Resultados generales

Resultados		
Valor Expuesto	US\$	2,929,481
Pérdida Anual Esperada	US\$	22,475
	‰	7.7‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$	%
50	308,366	10.5%
100	451,324	15.4%
250	627,963	21.4%
500	780,830	26.7%
1,000	886,534	30.3%
1,500	992,238	33.9%

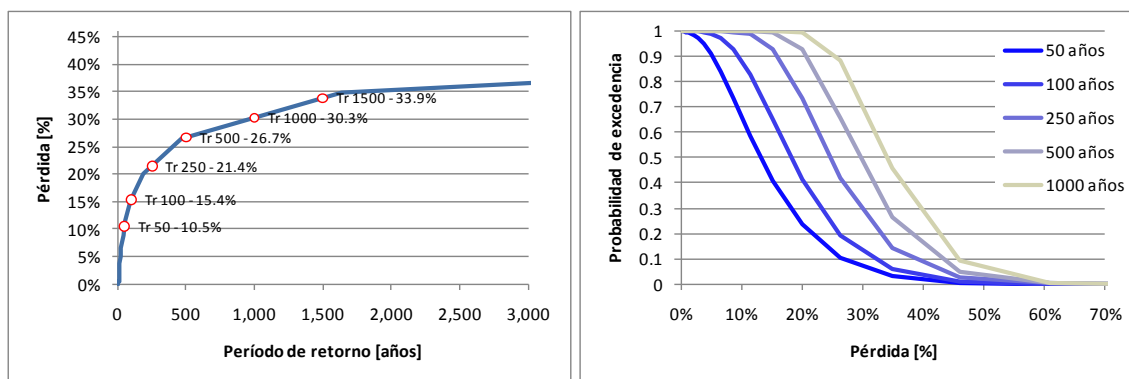


Figura 236

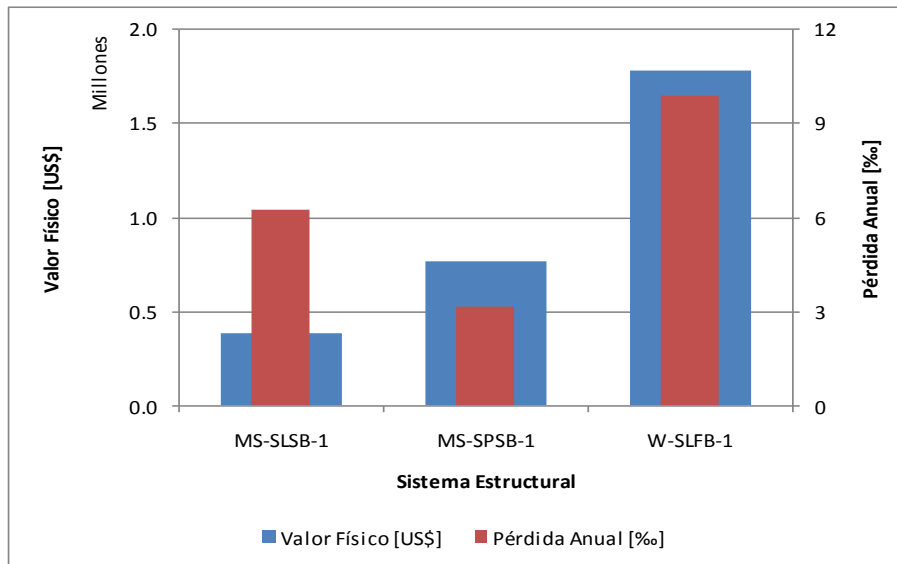
### Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

**Tabla 57**

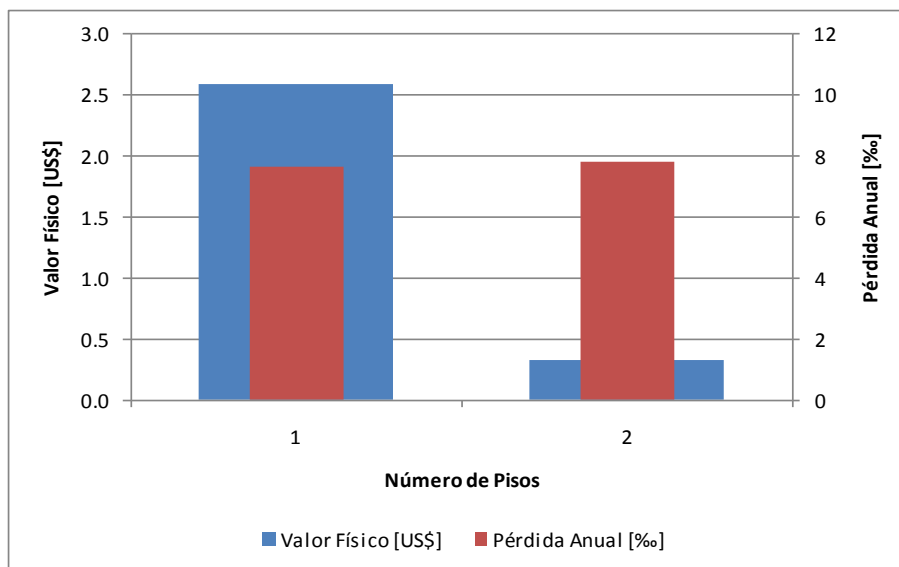
**Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)**

Sistema	Valor Expuesto		Pérdida Anual Esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[‰]
MS-SLSB-1	383,769	13.10%	2,407	6.27‰
MS-SPSB-1	765,540	26.13%	2,400	3.14‰
W-SLFB-1	1,780,172	60.77%	17,668	9.92‰
<b>Totales</b>	<b>2,929,481</b>	<b>100%</b>	<b>22,475</b>	<b>7.67‰</b>



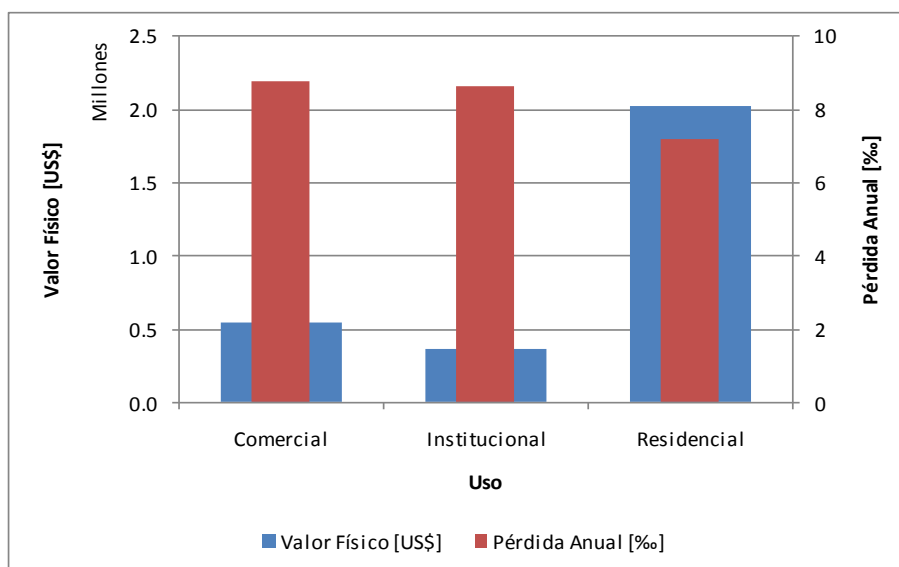
**Figura 237**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



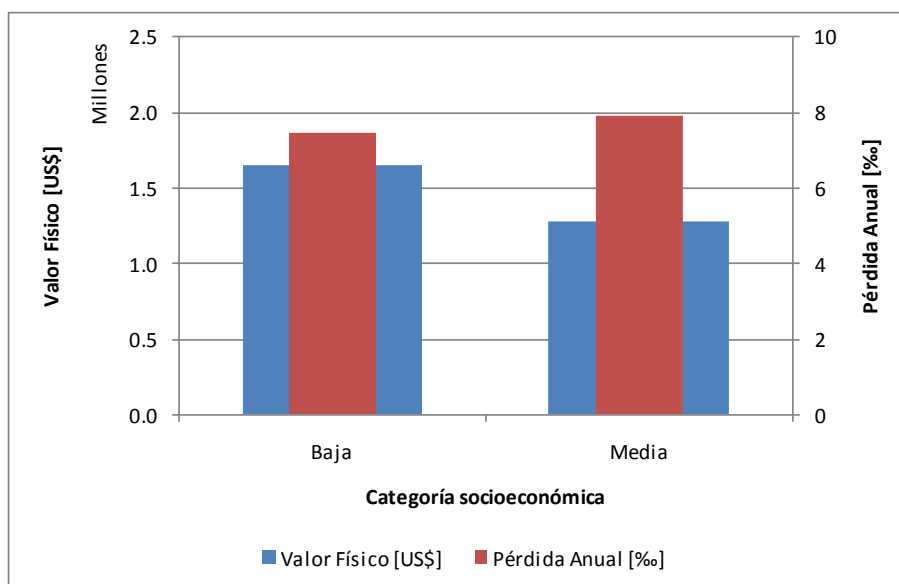
**Figura 238**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 239**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



**Figura 240**

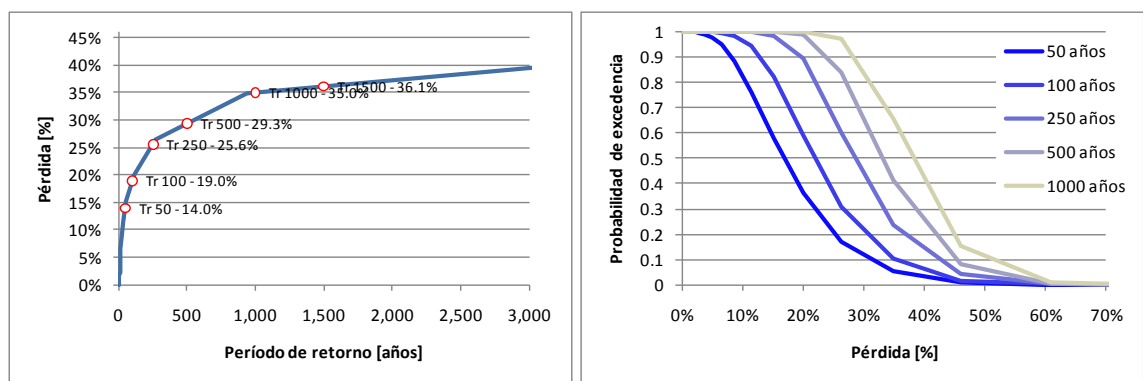
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica

## 15.2 Resultados para viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 58**

**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$	2,929,481
Pérdida Anual	US\$	36,944
Esperada	‰	12.6‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$	%
50	408,900	14.0%
100	555,536	19.0%
250	749,038	25.6%
500	858,417	29.3%
1,000	1,024,302	35.0%
1,500	1,057,185	36.1%



**Figura241**

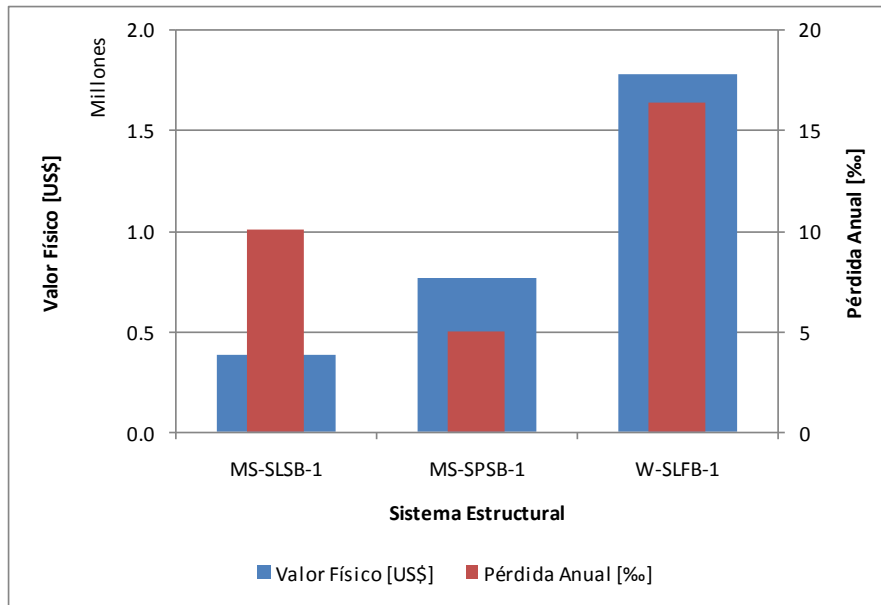
Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

**Tabla 59**

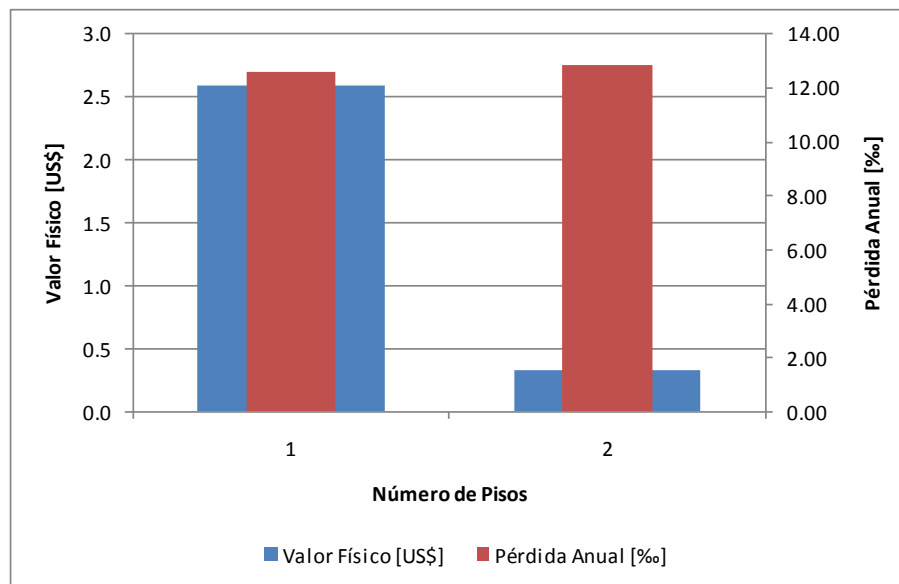
Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)

Sistema	Valor Expuesto		Pérdida Anual Esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[%]
MS-SLSB-1	383,769	13.10%	3,877	10.10‰
MS-SPSB-1	765,540	26.13%	3,866	5.05‰
W-SLFB-1	1,780,172	60.77%	29,202	16.40‰
<b>Totales</b>	<b>2,929,481</b>	<b>100%</b>	<b>36,944</b>	<b>12.61‰</b>



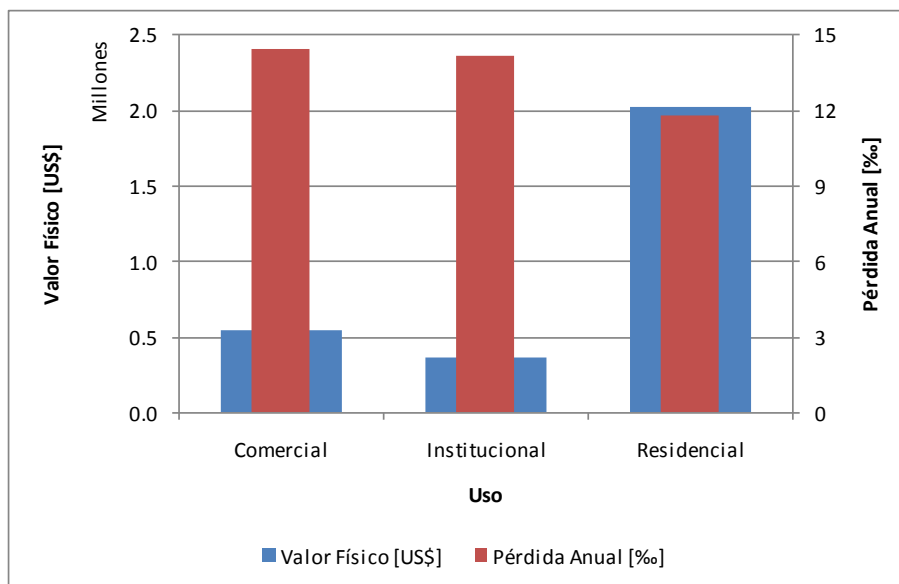
**Figura 242**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



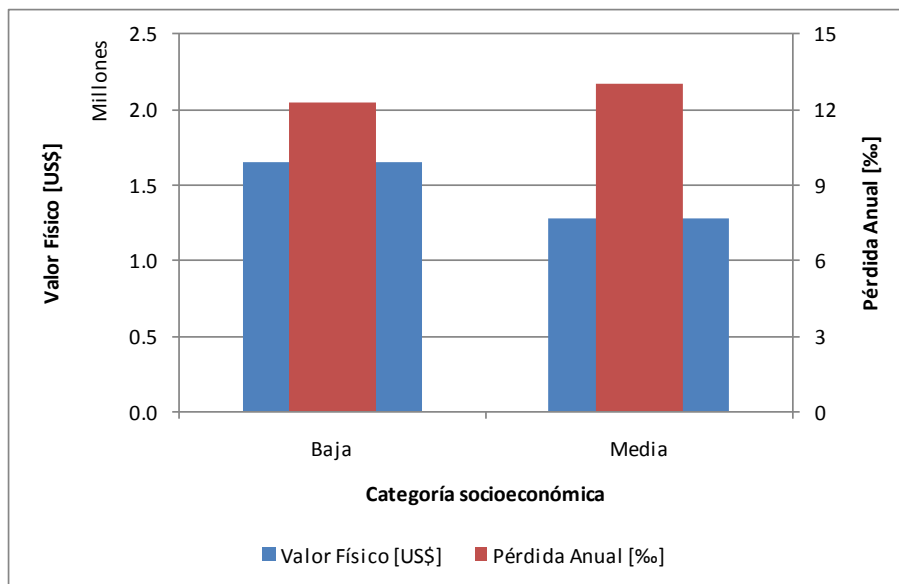
**Figura 243**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 244**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso

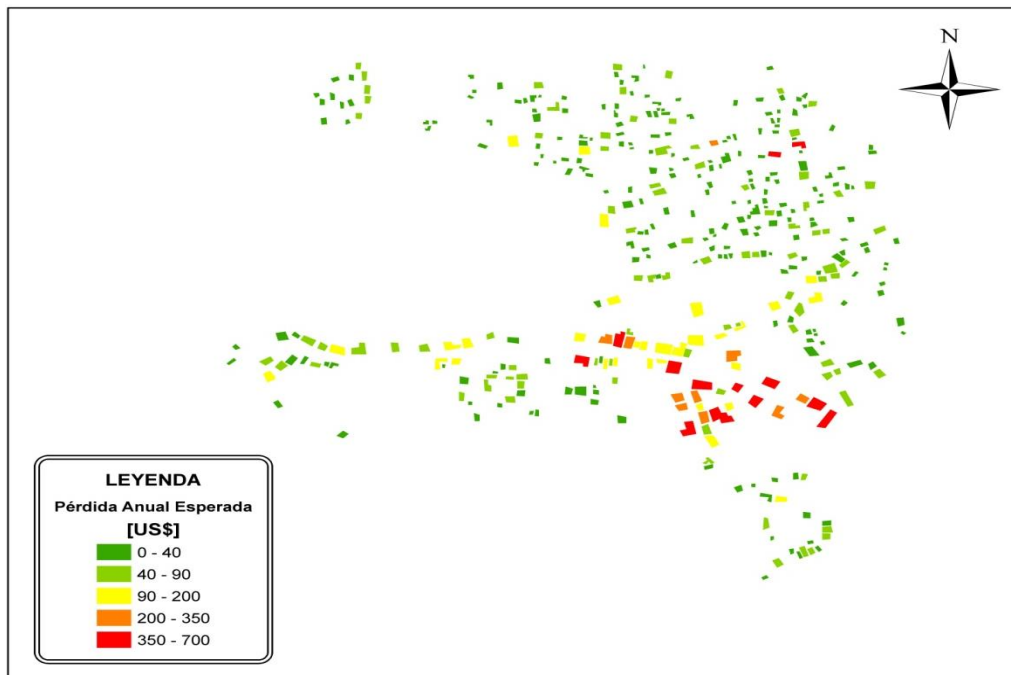


**Figura 245**

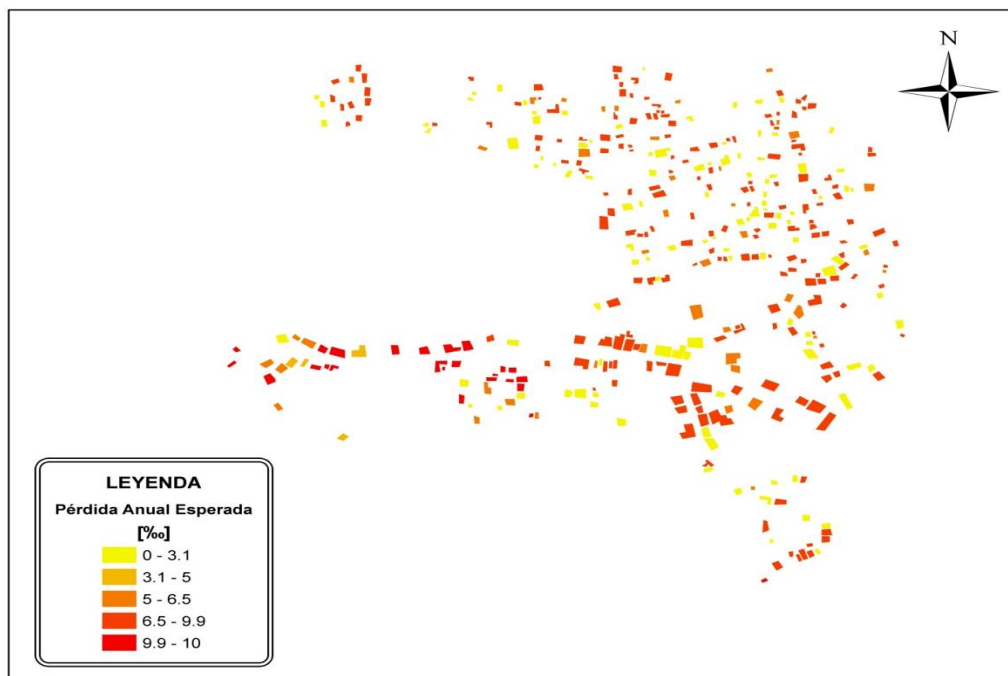
Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica

### 15.3 Mapas de riesgo

La información anterior se puede visualizar mediante mapas de riesgo. La Figura 246 presenta la distribución geográfica de la pérdida anual esperada por predio para viento huracanado sin tener en cuenta el efecto del cambio climático. Los resultados se presentan al millar del valor expuesto y en valor económico. La Figura 247 presenta los resultados equivalentes para viento huracanado teniendo en cuenta el efecto del cambio climático.

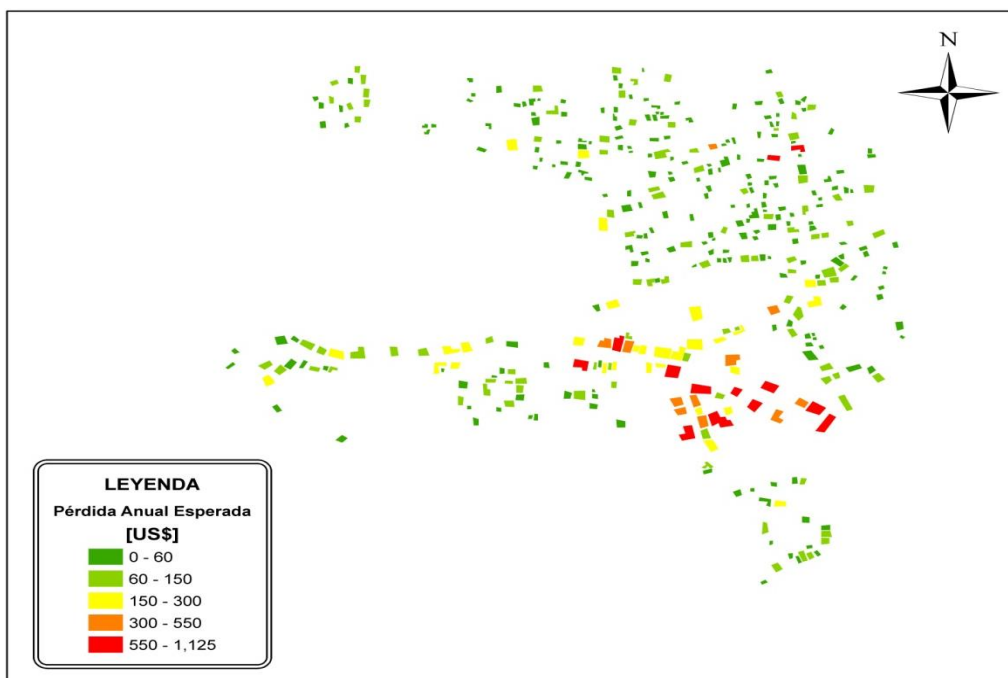


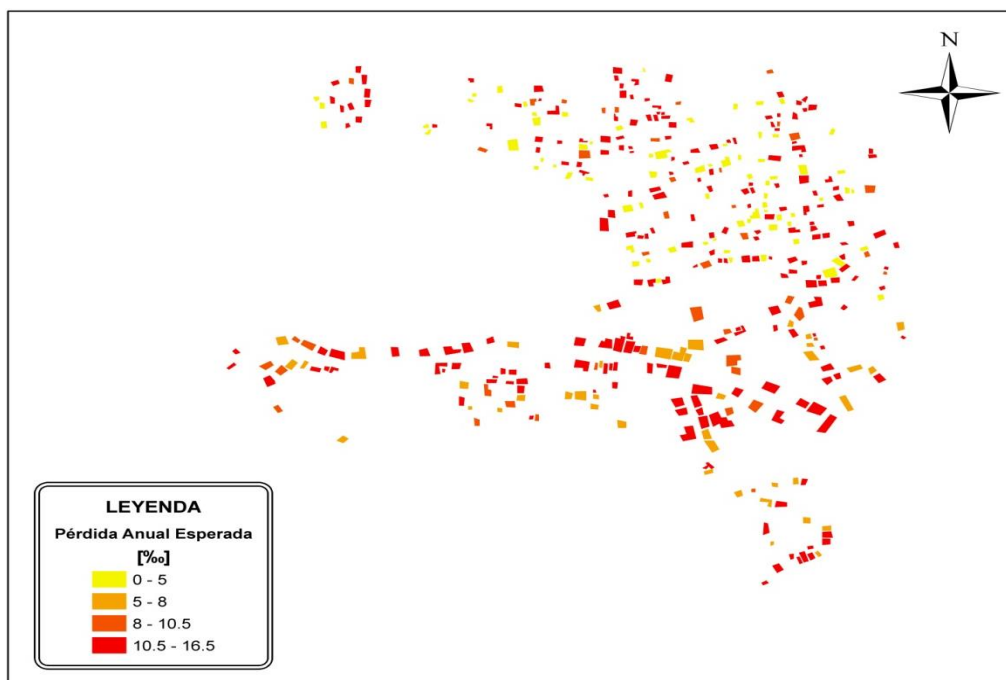




**Figura 246**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado sin cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)





**Figura 247**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado con cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)

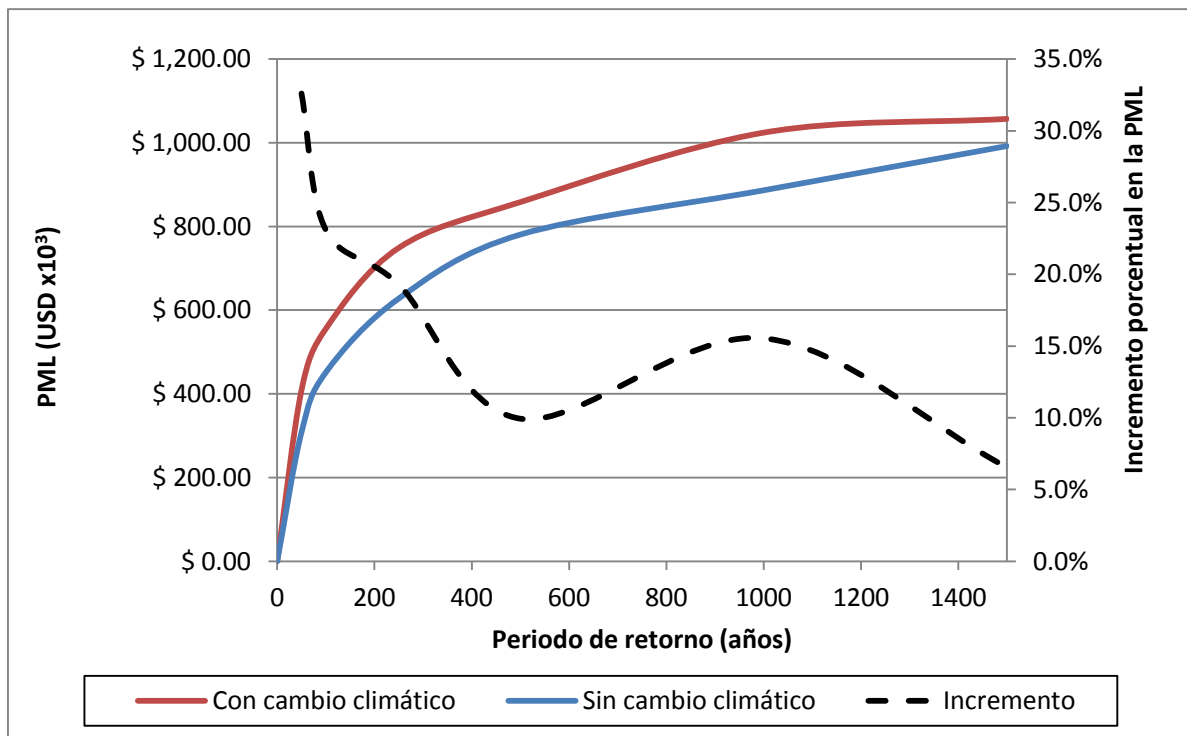
#### 15.4 Comparación de resultados

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de riesgo con y sin cambio climático. Se presenta adicionalmente el incremento porcentual en la Pérdida anual esperada y en los valores de Pérdida máxima probable (PML) para los periodos de retorno seleccionados. De los resultados presentados es posible ver como la pérdida anual esperada presenta un incremento de más del 64% al incorporar en el análisis el impacto del cambio climático. Por otra parte, los valores de PML presentan incrementos entre el 32% y el 7%, con una variación inversa con relación al periodo de retorno.

En la Figura248 se presentan de manera gráfica los resultados asociados a la PML.

**Tabla 60**  
**Comparación de resultados generales**

Con cambio climático			Sin cambio climático			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	2,929	Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	2,929	64.4%
Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>3</sup>	36.944	Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>6</sup>	22.475	
Esperada	‰	12.6‰	Esperada	‰	7.7‰	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		
años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	
50	408.90	14.0%	50	308.37	10.5%	32.6%
100	555.54	19.0%	100	451.32	15.4%	23.1%
250	749.04	25.6%	250	627.96	21.4%	19.3%
500	858.42	29.3%	500	780.83	26.7%	9.9%
1,000	1,024.30	35.0%	1,000	886.53	30.3%	15.5%
1,500	1,057.19	36.1%	1,500	992.24	33.9%	6.5%



**Figura248**  
Curvas de PML y su incremento porcentual

## **16. ANÁLISIS DE RIESGO PARA PUERTO BARRIOS**

En esta sección se presentan los resultados de la evaluación de pérdidas económicas por vientos huracanados para Puerto Barrios. El riesgo fue calculado tanto para condiciones actuales de amenaza como incorporando el impacto asociado al cambio climático. La metodología aplicada para el cálculo probabilista de riesgo se presenta en el Anexo 3.

Puerto Barrios, capital del departamento de Izabal es la población más grande de Guatemala sobre el Mar Caribe. La ciudad tiene una población de 55,700 habitantes y el municipio cuenta con una población rural de 37,200 habitantes según el censo del 2002. Se encuentra localizado sobre la Costa Atlántica a 240 kilómetros en dirección nororiental de la capital del país y tiene una extensión de 1,292 km<sup>2</sup>. Gran parte del área construida está destinada a comercio y vivienda así como a las facilidades necesarias para el funcionamiento del puerto, como zonas de almacenamiento de contenedores y edificaciones administrativas. La población cuenta con alrededor de 8,100 edificaciones, en su mayoría de 1 y 2 pisos construidas en madera y en mampostería simple principalmente.



**Figura 249**

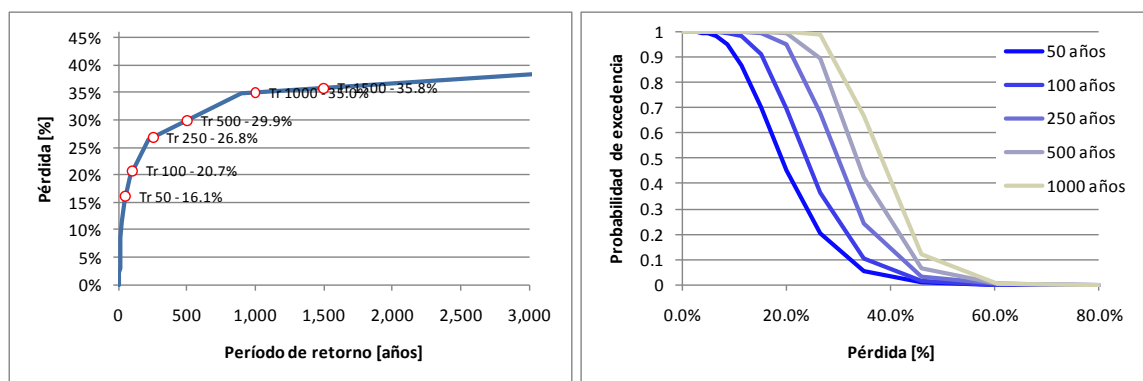
Localización geográfica de Puerto Barrios

## 16.1 Resultados para viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 61**

**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>6</sup>	617.63
Pérdida Anual	US\$ x 10 <sup>6</sup>	9.77
Esperada	‰	15.8‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x 10 <sup>6</sup>	%
50	99.68	16.1%
100	127.86	20.7%
250	165.27	26.8%
500	184.37	29.9%
1,000	215.99	35.0%
1,500	221.03	35.8%



**Figura250**

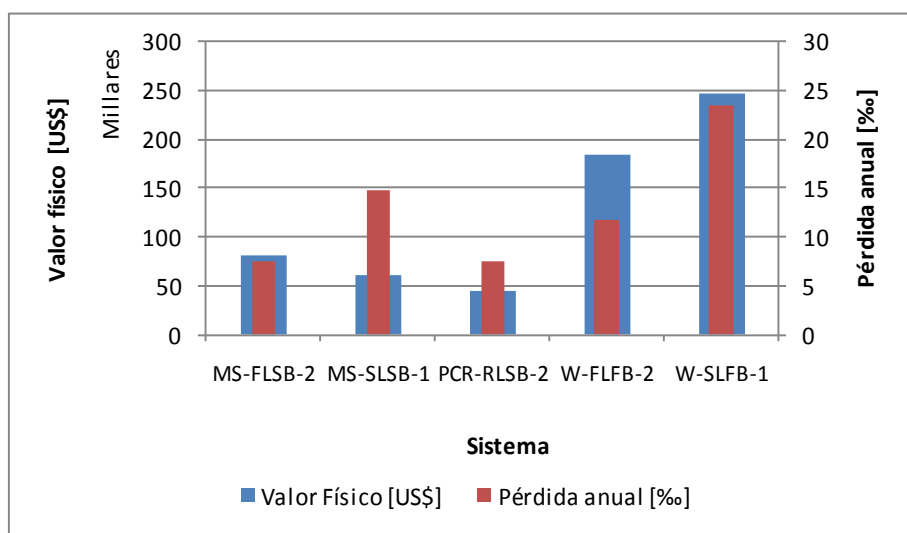
Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

**Tabla 62**

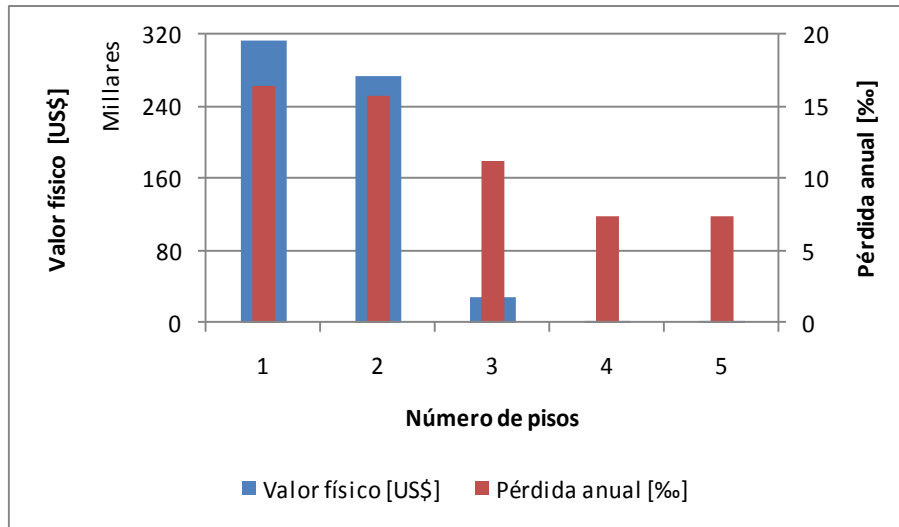
Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)

Sistema	Valor Expuesto		Pérdida Anual Esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[‰]
MS-FLSB-2	80,097,750	13.00%	593,281	7.41‰
MS-SLSB-1	61,193,808	9.90%	906,298	14.81‰
PCR-RLSB-2	45,176,780	7.30%	337,824	7.48‰
W-FLFB-2	183,966,126	29.80%	2,151,224	11.69‰
W-SLFB-1	247,198,777	40.00%	5,782,957	23.39‰
<b>Totales</b>	<b>617,633,241</b>	<b>100.00%</b>	<b>9,771,584</b>	<b>15.82‰</b>



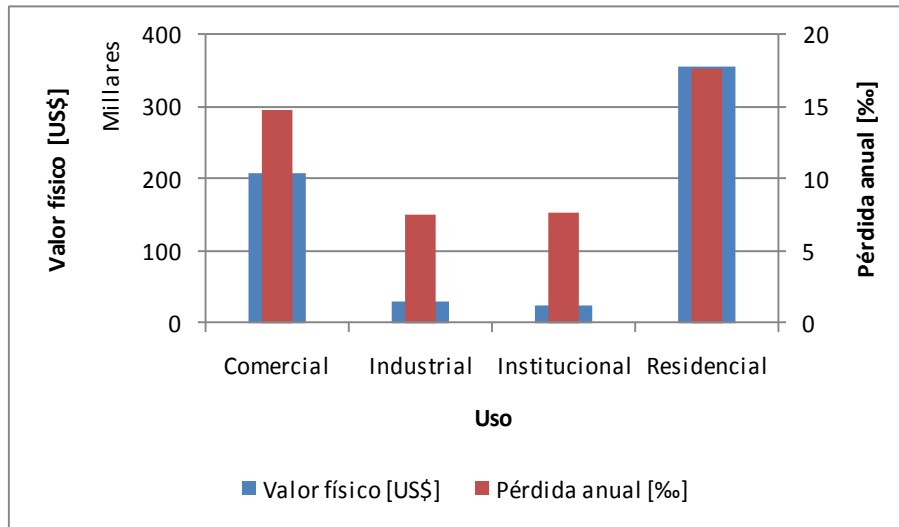
**Figura 251**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



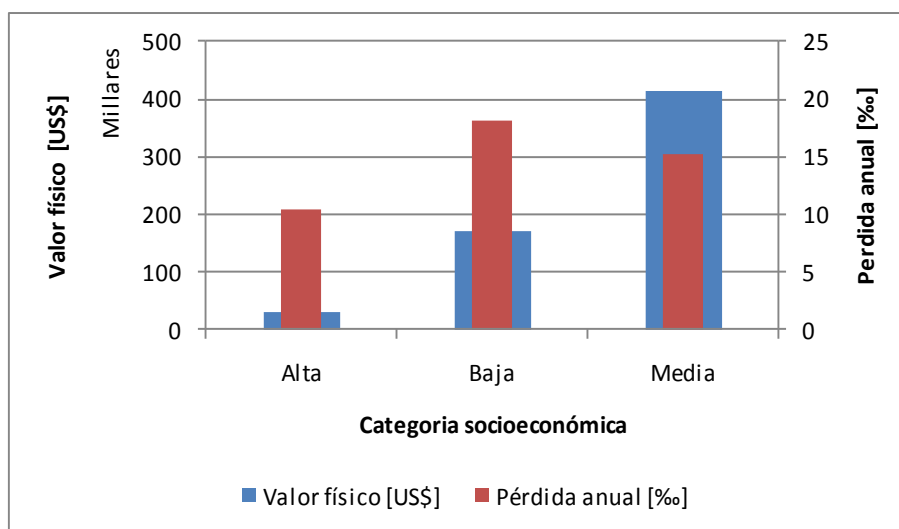
**Figura 252**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 253**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso



**Figura 254**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica

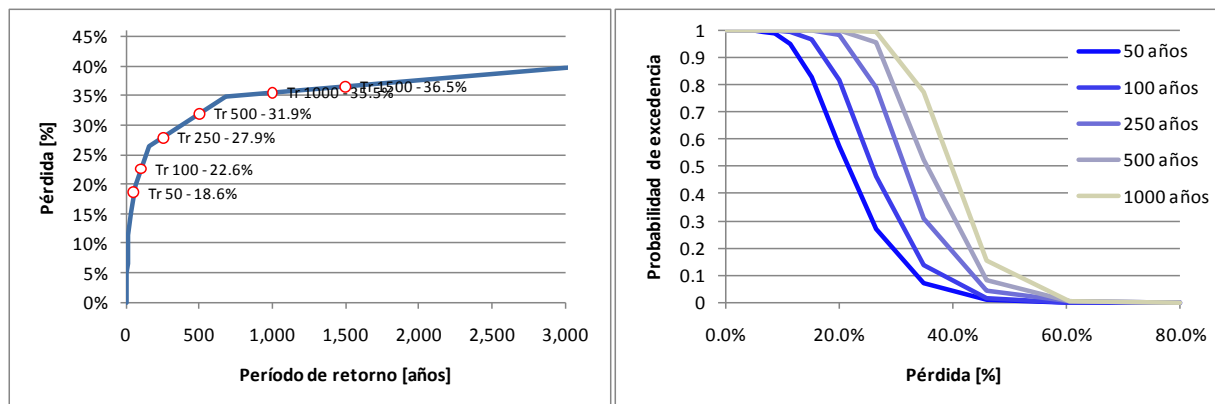
## 16.2 Resultados para viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático

**Tabla 63**

**Resultados generales**

Resultados		
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>6</sup>	617.63
Pérdia Anual	US\$ x 10 <sup>6</sup>	14.46
Esperada	‰	23.4‰
PML		
Período retorno	Pérdida	
años	US\$ x 10 <sup>6</sup>	%
50	114.68	18.6%
100	139.48	22.6%
250	172.13	27.9%
500	197.31	31.9%
1,000	219.18	35.5%
1,500	225.63	36.5%





**Figura255**

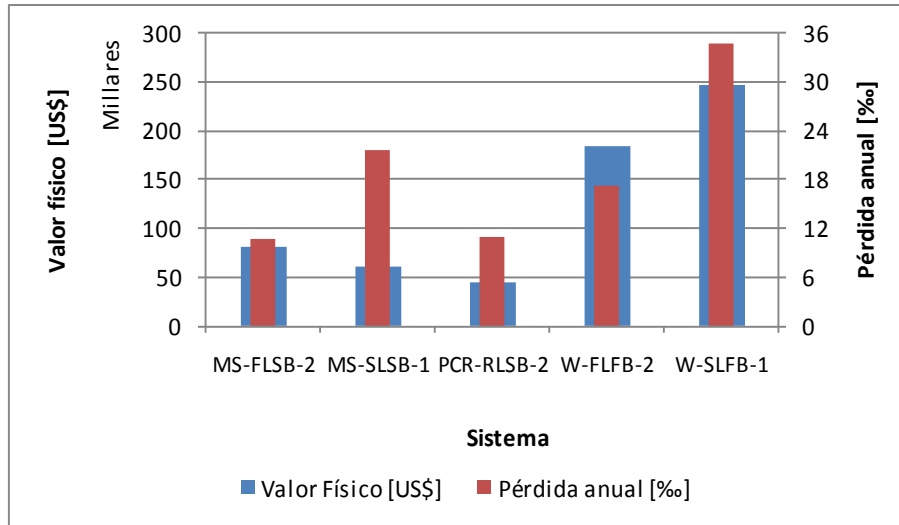
Resultados análisis

(Izquierda: Curva de PML, Derecha: Probabilidad de excedencia de pérdidas para diferentes períodos de exposición)

**Tabla 64**

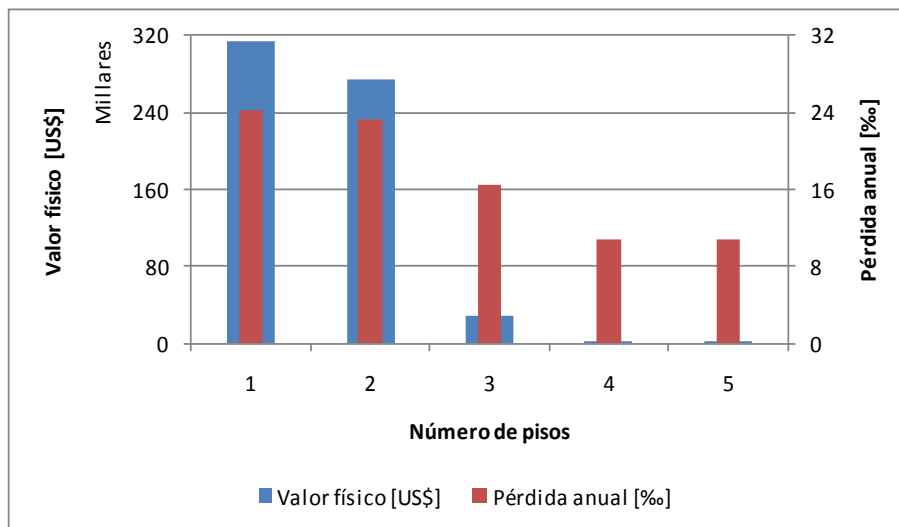
**Resultados por sistema estructural (valores expuestos y pérdida anual esperada)**

Sistema	Valor Expuesto		Pérdida Anual Esperada	
	[US\$]	[%]	[US\$]	[%]
MS-FLSB-2	80,097,750	13.00%	865,985	10.81 ‰
MS-SLSB-1	61,193,808	9.90%	1,322,349	21.61 ‰
PCR-RLSB-2	45,176,780	7.30%	489,275	10.83 ‰
W-FLFB-2	183,966,126	29.80%	3,196,496	17.38 ‰
W-SLFB-1	247,198,777	40.00%	8,590,446	34.75 ‰
<b>Totales</b>	<b>617,633,241</b>	<b>100%</b>	<b>14,464,551</b>	<b>23.4 ‰</b>



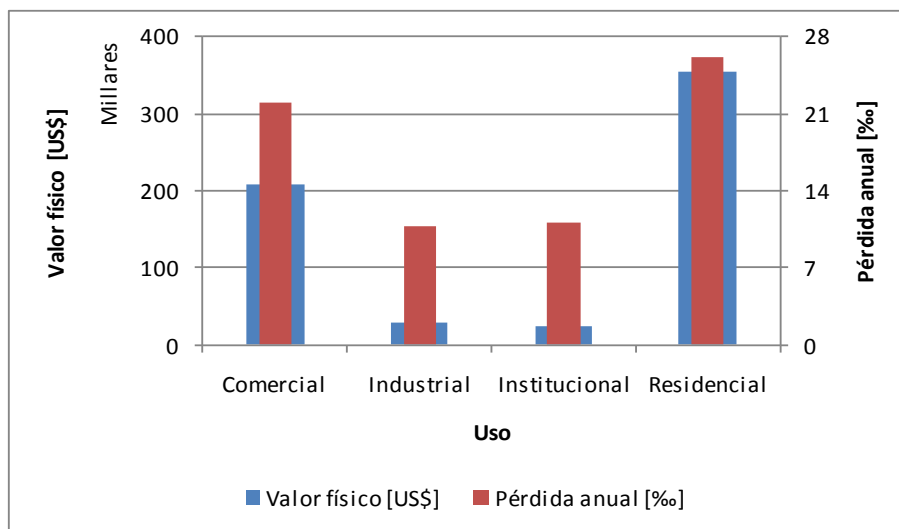
**Figura 256**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por sistema estructural



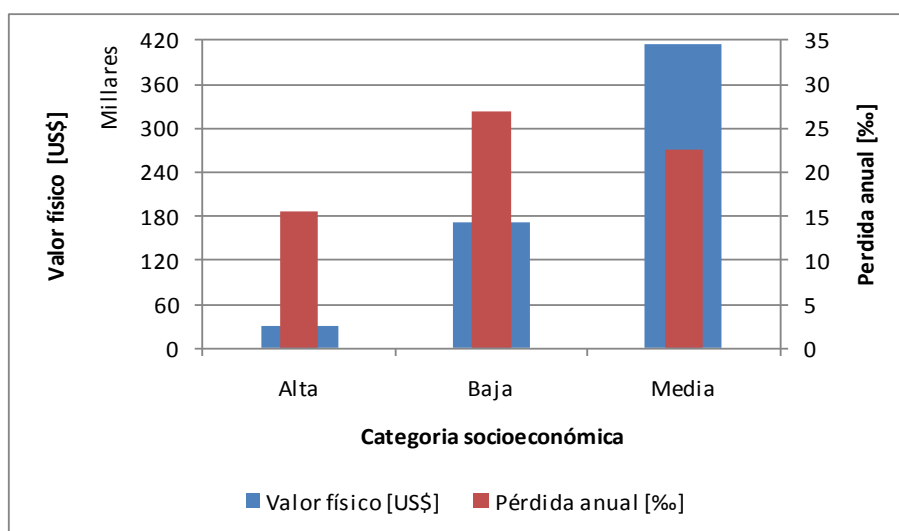
**Figura 257**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por número de pisos



**Figura 258**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por uso

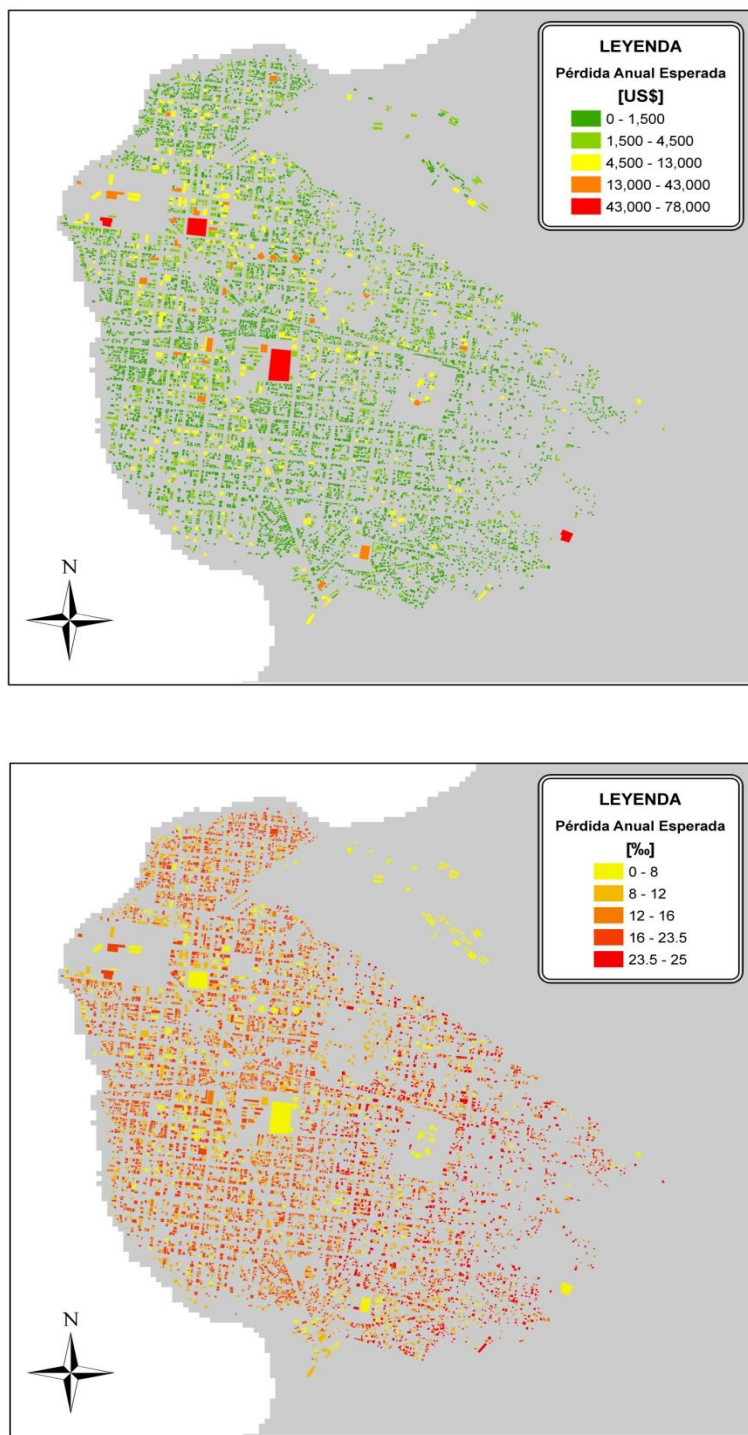


**Figura 259**

Valor físico y pérdida anual esperada (al millar del valor expuesto) por categoría socio-económica

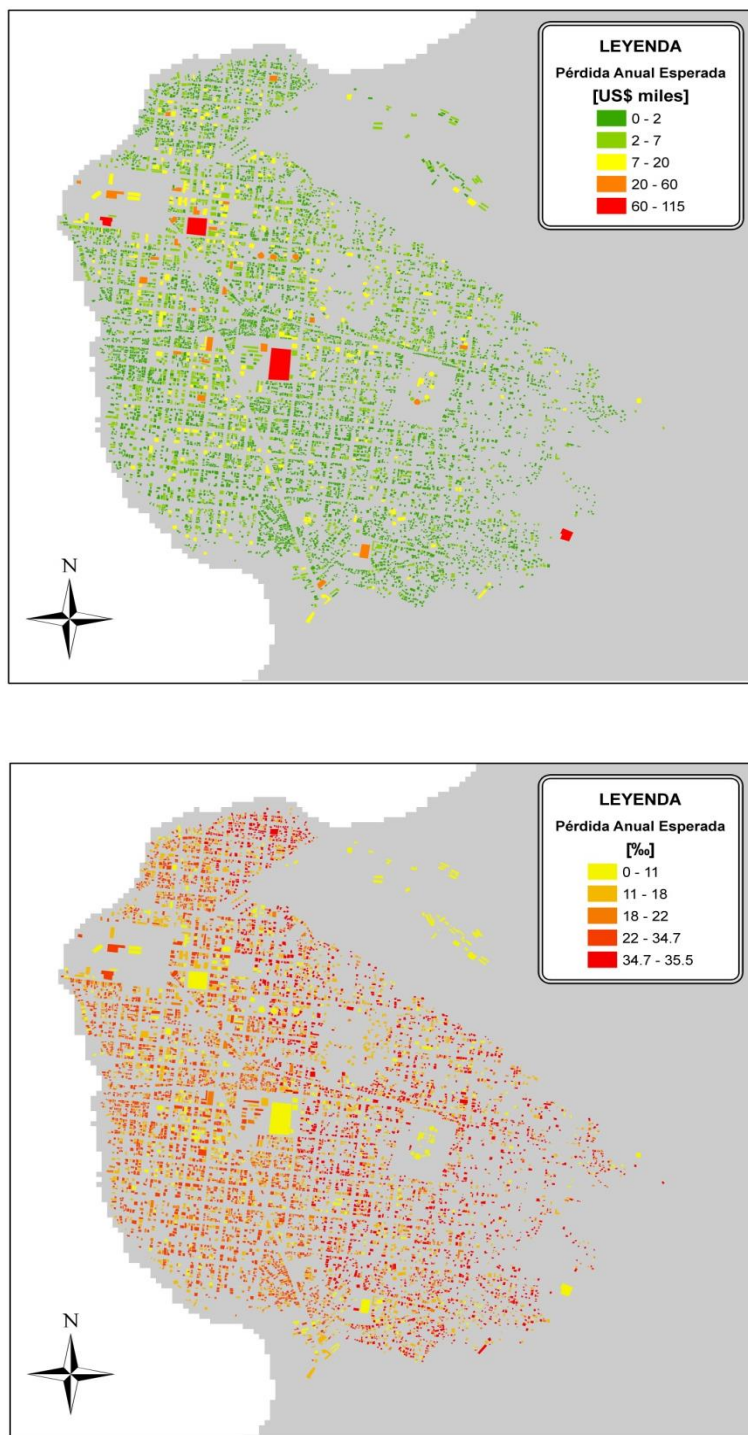
### 16.3 Mapas de riesgo

La información anterior se puede visualizar mediante mapas de riesgo. La Figura 260 presenta la distribución geográfica de la pérdida anual esperada por predio para viento huracanado sin incorporar el impacto asociado al cambio climático. Los resultados se presentan al millar del valor expuesto y en valor económico. La Figura 261 presenta los resultados equivalentes para viento huracanado incluyendo el impacto asociado al cambio climático.



**Figura 260**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado sin el impacto asociado al cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)



**Figura 261**

Pérdida anual esperada por predio para viento huracanado con el impacto asociado al cambio climático  
(Arriba: en valor, US\$; abajo: al millar del valor expuesto)

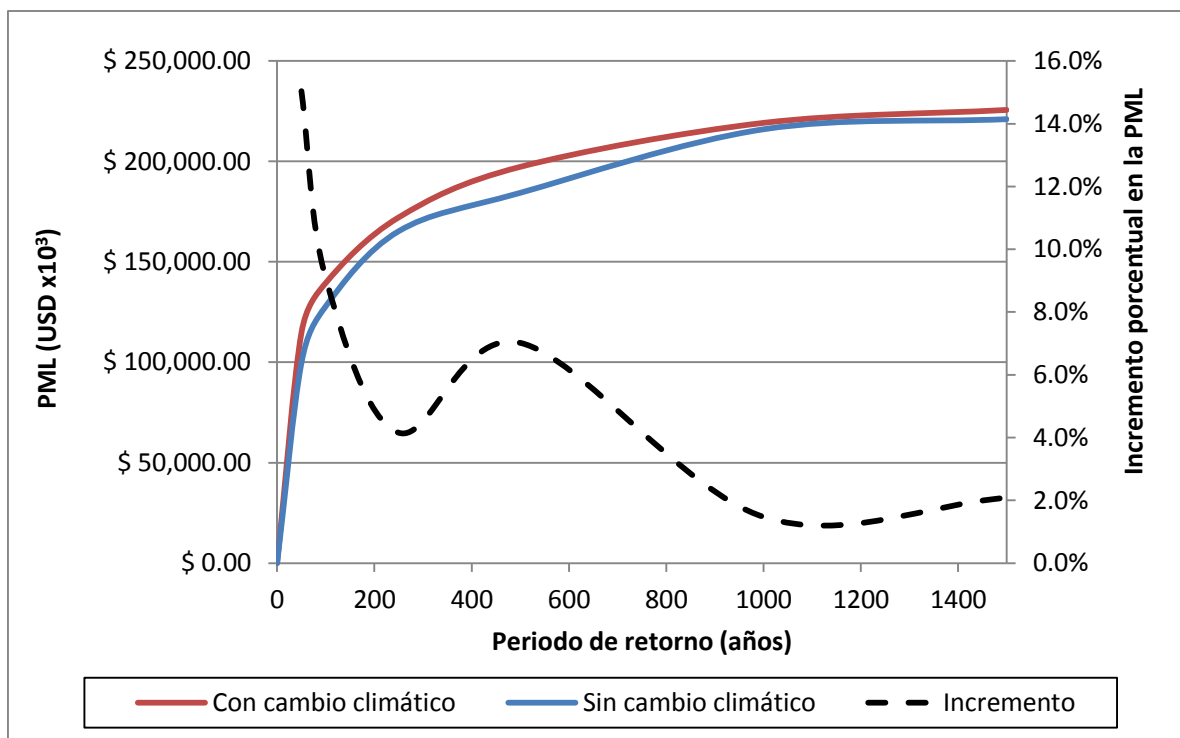
## 16.4 Comparación de resultados

A continuación se presentan los resultados para la evaluación de riesgo con y sin cambio climático. Se presenta adicionalmente el incremento porcentual en la Pérdida anual esperada y en los valores de Pérdida máxima probable (PML) para los periodos de retorno seleccionados. De los resultados presentados es posible ver como la pérdida anual esperada presenta un incremento de más del 48% al incorporar en el análisis el impacto del cambio climático. Por otra parte, los valores de PML presentan incrementos entre el 15% y el 2%, con una variación inversa con relación al periodo de retorno.

En la Figura 262 se presentan de manera gráfica los resultados asociados a la PML.

**Tabla 65**  
**Comparación de resultados generales**

Con cambio climático			Sin cambio climático			Incremento
Resultados			Resultados			Pérdida anual esperada
Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	617,633	Valor Expuesto	US\$ x 10 <sup>3</sup>	617,633	48.0%
Pérdida Anual Esperada	US\$ x 10 <sup>3</sup>	14,464.551	Pérdida Anual Esperada	US\$ x 10 <sup>6</sup>	9,771.584	
	‰	23.4‰		‰	15.8‰	
PML			PML			PML
Periodo retorno	Pérdida		Periodo retorno	Pérdida		
años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	años	US\$ x 10 <sup>3</sup>	%	
50	114,681.33	18.6%	50	99,687.80	16.1%	15.0%
100	139,483.55	22.6%	100	127,868.63	20.7%	9.1%
250	172,139.00	27.9%	250	165,271.78	26.8%	4.2%
500	197,311.33	31.9%	500	184,371.55	29.9%	7.0%
1,000	219,184.11	35.5%	1,000	215,998.07	35.0%	1.5%
1,500	225,634.61	36.5%	1,500	221,033.81	35.8%	2.1%



**Figura 262**  
Curvas de PML y su incremento porcentual

## **17. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Los resultados presentados en este informe pretenden dar una idea del orden de magnitud de las pérdidas esperadas en las bases de exposición empleadas, ante la acción de los vientos huracanados, incluyendo y sin incluir el impacto asociado al cambio climático. Los análisis son realizados entonces empleando bases de exposición y vulnerabilidad fijas, y variando la amenaza bajo el supuesto que se conocen las trayectorias de los huracanes generados en la cuenca del océano Atlántico Norte hasta el año 2055.

### **17.1 Acerca de la modelación de la amenaza**

El grupo consultor es consciente que la mayor afectación real en la república de Guatemala por cuenta de la ocurrencia de ciclones tropicales, corresponde a la desestabilización de los procesos hidrometeorológicos y no al impacto directo de los huracanes. No obstante, con el fin de mejorar las capacidades técnicas y operativas de las instituciones nacionales de planificación y gestión del riesgo en el uso de la Plataforma CAPRA, así como de realizar la estimación del riesgo de desastres considerando el escenario de cambio climático SRES A1B en la evaluación de la amenaza, las instituciones encargadas de la formulación de este proyecto de consultoría optaron por realizar la evaluación para vientos huracanados.

La modelación de la amenaza por vientos huracanados para Guatemala, incorporando el efecto del cambio climático, se basó en las simulaciones de posibles trayectorias futuras generadas por NCAR, para la cuenca del Atlántico Norte, empleando el modelo climático NRCM (Nested Regional Climate Model), con una malla anidada de resolución 12X12 Km. Dichas trayectorias fueron simuladas para las décadas de 1995-2005 (década de control), 2020-2030 y 2045-2055. Los periodos vacíos fueron completados por el grupo consultor haciendo uso de técnicas estadísticas basadas en proyecciones de la variabilidad multidecadal del Atlántico Norte (AMO por sus siglas en inglés Atlantic Multi-decadal Oscillation), la cual es una variabilidad climática natural que se manifiesta como una variación oscilante en el tiempo de la temperatura de la superficie oceánica.



Es importante mencionar que la modelación climática en diferentes escalas espaciales es un proceso que tiene en cuenta numerosas variables que permiten estimar en diferentes zonas de interés el comportamiento predominante del clima. Los modelos desarrollados hasta el momento en el mundo para obtener dicha información con algún nivel de confianza, tienen resoluciones espaciales variables. Si bien la resolución espacial usada en este estudio (modelo NCRM de NCAR) para la generación y modelación de huracanes en la cuenca del Atlántico Norte, es adecuada para un análisis a nivel país, se debe tener en cuenta que los huracanes son eventos recurrentes que corresponden a fenómenos meteorológicos y no a fenómenos predominantes en una escala global (climática), como sí lo es el cambio climático.

Por lo tanto se debe entender que la precisión de los modelos climáticos para interpretar y modelar eventos netamente meteorológicos es baja. Lo anterior no quiere decir que los resultados obtenidos no sean aceptables, ya que si bien las trayectorias generadas por NCAR en algunos casos desafían las condiciones naturales de un huracán, son útiles para tener en cuenta los efectos predominantes en términos de velocidad del viento a una escala nacional.

## **17.2 Acerca de las bases de exposición**

Los modelos de exposición empleados corresponden a levantamientos de información basados en indicadores socioeconómicos generales del país. La valoración económica de los activos expuestos es uno de los parámetros más importantes en análisis de riesgo, dado que corresponde al valor de reposición del cual se deriva el costo de la pérdida para el responsable del bien afectado o del portafolio de bienes. Es por lo tanto imperativo contar con información de mayor detalle para la correcta evaluación del riesgo y su utilización en la toma de decisiones.

En el caso particular de este estudio, la SE-CONRED ha dado iniciativa para recopilar los datos necesarios para la definición de los elementos expuestos, mediante la contratación de otro equipo de trabajo en una consultoría independiente, que se estará realizando en paralelo a la presente consultoría, sobre el levantamiento de información y actualización de las bases de datos de infraestructura crítica de algunos municipios seleccionados, con el fin de enriquecer la base de información y mejorar la estimación del riesgo. Por razones ajenas a esta consultoría, para el

momento en que de acuerdo con los cronogramas establecidos, se debía realizar el análisis de riesgo, las bases de exposición de infraestructura crítica no se encontraban listas a un nivel mínimo que permitiera su implementación en los análisis. Por tal motivo, se decidió de común acuerdo con la SE-CONRED y con el representante local del BID, avanzar en el cálculo del riesgo establecido para la presente consultoría con el uso de bases de exposición levantadas por el consultor en Guatemala de manera independiente a este proyecto.

### **17.3 Acerca de la vulnerabilidad**

Es necesario también involucrar al sector académico del país mediante la investigación en lo relacionado al comportamiento estructural de los tipos constructivos predominantes en Guatemala, de manera que, en el largo plazo, el país cuente con modelos de vulnerabilidad que sean aceptados por la comunidad científica guatemalteca de manera que se enriquezcan los resultados aquí presentados. En el caso de este estudio, las funciones de vulnerabilidad empleadas fueron asignadas con base en el criterio y experiencia del grupo consultor.

### **17.4 Acerca del perfil de riesgo catastrófico**

El perfil de riesgo catastrófico indica las pérdidas esperadas a nivel nacional teniendo en cuenta las construcciones e infraestructura existentes. En otras palabras, el perfil de riesgo indica las posibles pérdidas económicas sobre el stock de capital expuesto del país. Los resultados del perfil son de la mayor relevancia para la planificación financiera y presupuestaria a nivel gubernamental, dado que informa de la cuantía de pérdidas por desastres extremos que tendría que asumir el gobierno en caso de materializarse el riesgo. Esta cuantía debe ser incluida en el presupuesto de la nación como un pasivo contingente no explícito.

Desde el punto de vista financiero, la gestión de riesgos involucra cinco pasos: i) identificar y analizar el riesgo; ii) examinar la factibilidad de alternativas o técnicas para su reducción; iii) seleccionar las mejores técnicas disponibles y factibles; iv) implementar las técnicas escogidas; y v) darle seguimiento al programa. Aunque aparentemente es un proceso similar al que se propone desde la perspectiva de las ciencias aplicadas y sociales, en realidad el riesgo desde el punto de

vista financiero se refiere al potencial de pérdidas económicas y su reducción se basa en la implementación de medidas que permitan contar con recursos económicos en el momento en que se presente un desastre y se puedan cubrir total o parcialmente dichas pérdidas. En otras palabras, desde el punto de vista financiero, la gestión del riesgo tiene como objetivo identificar y analizar las exposiciones de pérdida, examinando las posibilidades de transferencia y retención de esas pérdidas, llevando a cabo las transacciones del caso y estando atentos a los cambios o ajustes que deban realizarse. Esto involucra a la industria de seguros y reaseguros, la titularización y otros esquemas financieros utilizados o que se podrían explorar para vincularlos a una gestión integral del riesgo colectivo desde una visión multisectorial, interinstitucional y multidisciplinaria.

El análisis presentado en este informe se concentra en la identificación del riesgo del país (en general, por unidades geográficas y por sectores; corresponde al primero de los pasos mencionados) ante la amenaza de viento huracanado (con y sin el impacto asociado al cambio climático), utilizando como medida la Pérdida Máxima Probable (PML o Probable Maximum Loss en inglés) para diferentes periodos de retorno y la Pérdida Anual Esperada (AAL o Average Annual Loss en inglés) o prima técnica de riesgo. Con base en estos resultados, se estima el riesgo específico a nivel de país y la concentración del riesgo. Los valores de PML y AAL son los principales resultados de este análisis. Estas medidas o métricas son de especial importancia para el futuro diseño de instrumentos de retención (financieros) o transferencia de riesgo, y por lo tanto serán un aporte de especial valor para definir, con estudios complementarios, una estrategia de protección financiera para cubrir la responsabilidad fiscal del Estado.

Cabe mencionar que, si bien la modelación de la amenaza incluye simulaciones de las posibles condiciones futuras en términos de vientos huracanados, la exposición y vulnerabilidad son las dadas por las condiciones actuales de desarrollo del país. El análisis de pérdidas incorporando el efecto del cambio climático hasta el 2055, no incluye ninguna consideración acerca de la variación en la vulnerabilidad o en las condiciones de exposición, principalmente porque estos componentes del análisis están fuertemente ligados a las características socioeconómicas y de desarrollo del país, al crecimiento de las ciudades, a las necesidades de infraestructura de la población y de los sectores económicos, a decisiones políticas, entre otros factores. Por lo tanto,

las condiciones futuras de exposición y vulnerabilidad, están fuertemente relacionadas con el futuro económico y político de Guatemala, y sus implicaciones a nivel nacional y local.

Con esto se enfatiza que el riesgo de desastre no depende exclusivamente de las condiciones de amenaza de un territorio, sino que es función principalmente de sus características socioeconómicas y de desarrollo, las cuales influyen significativamente en las pérdidas futuras esperadas. El riesgo debe entonces entenderse, afrontarse y gestionarse desde una perspectiva de desarrollo para el país, y no como un problema derivado de la variabilidad climática global.

### **17.5 Acerca del análisis de riesgo en poblaciones seleccionadas**

En todos los casos analizados se observa que la pérdida anual esperada presenta un incremento importante al incorporar en el análisis el impacto del cambio climático. Por otra parte, los valores de PML presentan incrementos también importantes, pero en general menores a los asociados a la pérdida anual esperada. Esto permite concluir que la variación producida por el cambio climático induce un cambio significativo en la región de pérdidas pequeñas de la curva de excedencia de pérdidas, lo cual implica un aumento importante en la pérdida anual esperada. A medida que aumenta el valor de pérdida, el impacto disminuye, lo cual implica una relación inversa entre el incremento porcentual y el periodo de retorno. En conclusión, si bien el efecto del cambio climático es de manera general el incremento de las pérdidas, se puede decir que dicho incremento es significativo para el cálculo de la pérdida anual esperada y menos importante para el cálculo de las PML. En otras palabras, las ciudades aquí analizadas pueden esperar que se incremente de manera importante la frecuencia con la que se ven afectadas por vientos huracanados, y de manera menos importante el valor de pérdidas asociadas a huracanes catastróficos.

A continuación se dejan explícitas las limitaciones en la información utilizada para los análisis, lo cual debe servir de base para los planes de trabajo y estudios futuros con miras a mejorar la calidad y confiabilidad de estos resultados aquí presentados.

- (a) Información de amenaza por viento huracanado sin cambio climático: se puede considerar de muy buena calidad y completa para efectos del presente análisis. El costo y tiempo requerido para mejorar este tipo de información es muy alto y requiere sobre todo de la disponibilidad de más y mejor información.
- (b) Información de amenaza por viento huracanado con cambio climático: se puede considerar de muy buena calidad y completa para efectos del presente análisis. Es importante mencionar que Guatemala cuenta hoy en día con la única evaluación probabilista de riesgo ante ciclones tropicales que incorpora de manera explícita y rigurosa el cambio climático en el mundo. Por lo tanto, es importante que el país, a través de sus instituciones como lo son CONRED, SEGEPLAN e INSIVUMEH, continúen de manera entusiasta con el apoyo a este tipo de iniciativas.
- (c) Información de exposición: debe recurrirse a las bases catastrales de las poblaciones. El modelo utilizado en el presente análisis solo sirve con propósitos ilustrativos e indicativos de valores globales de pérdida. Para efectos de resultados para toma de decisiones debe contarse con bases catastrales y con índices oficiales de ocupación y costos. Alternativamente deben plantearse programas de levantamiento de información con base en visitas de campo intensivas.
- (d) Las funciones de vulnerabilidad deben revisarse y evaluarse en un plan en el mediano plazo, mediante la vinculación de universidades y centros de investigación. Estos trabajos deben basarse en modelaciones analíticas y experimentales de los tipos constructivos típicos de las ciudades y en observaciones del comportamiento de tipos constructivos característicos ante eventos determinados.
- (e) Los resultados de los análisis de riesgo y su interpretación para la toma de decisiones debe realizarse de manera conjunta con las entidades y especialistas a cargo de cada uno de los aplicativos que pueden derivarse de estos resultados.

Los resultados presentados anteriormente dependen directamente de la calidad y tipo de información suministrada al modelo. Entre más detallada y confiable sea la información, menor será la incertidumbre asociada a los resultados y por lo tanto el proceso de toma de decisiones podrá realizarse con mayor nivel de confianza.

En particular se hace especial énfasis en actualizar la información referente a:

- Inventario de construcciones expuestas incluyendo sus características principales.
- Valoración de activos, sus contenidos y posibles pérdidas consecuenciales.
- Identificación de tipos estructurales dominantes y distribución dentro de las ciudades.
- Categorización de tipos de contenidos, calificación y valoración.
- Calificación de la vulnerabilidad estructural y humana ante las diferentes fuentes de amenaza.
- Inventario, valoración y calificación de toda la infraestructura complementaria expuesta incluyendo vías, puentes, infraestructura de servicios públicos, instalaciones industriales importantes, plantas de generación de energía, aeropuertos y en general toda la infraestructura expuesta relevante del país.

Con información de exposición detallada, el análisis de riesgo constituye la herramienta principal para lo siguiente:

- (a) Identificación de infraestructura crítica para la ciudad en términos de peligrosidad, valor expuesto, ocupación humana y otros criterios. Esto con el fin de priorizar inversión pública en recuperación o modernización de elementos claves para el desarrollo.
- (b) Evaluación del riesgo por sectores incluyendo residencial, industrial, comercial, salud, educación y otros.
- (c) Requerimientos de reforzamiento de activos públicos, especialmente edificaciones indispensables y de atención a la comunidad.

- (d) Estimación del riesgo de activos privados para estratos bajos, medios y altos con fines de protección financiera y concientización del riesgo.
- (e) Análisis de vulnerabilidad y requerimiento de reforzamiento para mitigación de impactos de los sistemas de servicios públicos que puedan verse afectados.
- (f) Requerimientos especiales para los planes de ordenamiento territorial, definición de zonas de alto riesgo, restricciones, reubicación de vivienda y otras.

Finalmente, un análisis con información de mayor calidad es útil para dimensionar variables relevantes en la formulación de planes y preparativos de emergencia de las ciudades, incluyendo los siguientes:

- (a) Sector salud: requerimientos de atención médica para heridos, centros de atención de emergencia, ubicación, requerimientos de servicios públicos, personal médico, ambulancias, disposición de víctimas mortales.
- (b) Seguridad: requerimientos de seguridad en los instantes y días posteriores al evento en cuanto a organización de la fuerza pública. Posibilidad de problemas sociales por falta de alimentos o de servicios.
- (c) Atención de la emergencia: planeación de las diferentes acciones posteriores a la ocurrencia del desastre tales como reconocimiento, identificación y clausura de edificaciones afectadas, demoliciones, avisos a la población, cuadrillas de rescate, manejo de donaciones, suministros de alimentación, viviendas temporales, manejo de residuos, disponibilidad de maquinaria, etc.
- (d) Requerimientos de viviendas temporales, campamentos, comida, víveres, suministros, atención médica post-emergencia, etc. Problemática de la vivienda de interés social.

- (e) Problemática de personas sin empleo o lugar de trabajo según zonas, requerimientos inmediatos, afectación de la producción, efectos a largo plazo, medidas de mitigación de impactos.
- (f) Planes de contingencia para los diferentes sectores de servicios públicos y sociales incluyendo suministro de agua, energía, gas, transporte público, generación de energía, telecomunicaciones y otras.
- (g) Pérdidas económicas esperadas, efectos en el mediano y largo plazo en las finanzas públicas, necesidades de mecanismos de transferencia del riesgo, planes de aseguramiento, proyección hacia el futuro.

El análisis de riesgo con las herramientas indicadas se convierte por lo tanto en un elemento fundamental en la gestión integral del riesgo, factor clave para el desarrollo económico y social. El proceso exige la participación activa de entidades públicas, Universidades, sector privado y de la comunidad en general relacionada con esta temática.



## 18. REFERENCIAS

Amador J.A., Alfaro E.J., Rivera E.R., Calderón B., (2010).“Climatic Features and Their Relationship with Tropical Cyclones Over the Intra-Americas Seas”. Chapter 9 in: Hurricanes and Climate Change, Volume 2. (Edited by Elsner J.B., Hodges R.E., Malmstadt J.C., Scheitlin K.N. Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 255 p.), pp. 149-173.

Avelar C, (2006) “Expresiones para modificar el intervalo de promediación en la velocidad de viento, entre los resultados de un modelo paramétrico y los boletines de huracanes”. Reporte Interno, ERN Ingenieros Consultores, julio 2006.

Avelar C, (2006-2) “Procedimiento para determinar áreas de exposición ante los efectos del viento y asignar factores de topografía”. Reporte Interno, ERN Ingenieros Consultores, julio 2006.

ERN-AL (2009). “ERN-Huracán”. Programa de cálculo probabilista de amenaza por ciclones tropicales.

ERN-AL (2010). “Informe Técnico ERN-CAPRA-T2.1: Caracterización, clasificación y valoración de elementos expuestos”. CAPRA: CENTRAL AMERICA PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT. Proyecto de implementación de la plataforma CAPRA en Guatemala. Banco Interamericano de Desarrollo BID. 2010.

ERN-AL (2010). “Informe Técnico ERN-CAPRA-T2.2: Propuesta de indicadores y funciones de vulnerabilidad”. CAPRA: CENTRAL AMERICA PROBABILISTIC RISK ASSESSMENT. Proyecto de implementación de la plataforma CAPRA en Guatemala. Banco Interamericano de Desarrollo BID. 2010.

GLOBE Task Team and others (Hastings, David A., Paula K. Dunbar, Gerald M. Elphinstone, Mark Bootz, Hiroshi Murakami, Hiroshi Maruyama, Hiroshi Masaharu, Peter Holland, John Payne, Nevin A. Bryant, Thomas L. Logan, J.-P. Muller, Gunter Schreier, and John S.

MacDonald), eds. 1999. The Global Land One-kilometer Base Elevation (GLOBE) Digital Elevation Model, Version 1.0. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Geophysical Data Center, 325 Broadway, Boulder, Colorado 80305-3328, U.S.A. Digital data base on the World Wide Web (URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/topo/globe.html>) and CD-ROMs

Goosse H., Barriat P.Y., Lefebvre W., Loutre M.F., Zunz V., (2010). “Introduction to climate dynamics and climate modeling”. Online textbook available at <http://www.climate.be/textbook>. Université catholique de Louvain - Institut d'Astronomie et de Géophysique Georges Lemaître.

Gualdi S., Scoccimarro E., Navarra A., (2008). “Changes in tropical cyclone activity due to global warming: Results from a high-resolution coupled general circulation model”. *Journal of Climate* 21, pp: 5204–5228

Holland G.J., Webster P.J., (2007). “Heightened tropical cyclone activity in the North Atlantic: natural variability or climate trend?” *Philosophical Transactions of the Royal Society of Mathematical Physical and Engineering Sciences* 365(1860), pp.: 2695-2716.

IPCC - Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, (2007). “Climate change 2007: The physical science basis”. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) Cambridge University Press, Cambridge-New York, 996 p.

IPCC – Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático, (2012). “Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Resumen para responsables de políticas”. IPCC 2012.

Knapp, K. R., M. C. Kruk, D. H. Levinson, H. J. Diamond, and C. J. Neumann, (2010). “The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying tropical cyclone best track data”. *Bulletin of the American Meteor. Society*, 91, 363-376.

Kaplan SST V2 data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Landsea, C.W., Harper, B.A., Hoarau, K. and Knaff, J.A., (2006). “Can we detect trends in extreme tropical cyclones?” *Science*, 313(5786): 452-454.

Walsh K., Lavender S., Murakami H., Scoccimarro E., Caron L.P., Ghanous M., (2010). “The Tropical Cyclone Climate Model Intercomparison Project”. Chapter 1 in: *Hurricanes and Climate Change, Volume 2*. (Edited by Elsner J.B., Hodges R.E., Malmstadt J.C., Scheitlin K.N. Springer Dordrecht Heidelberg London New York. 255 p.), pp. 1-24.

Zhao M., Held I., Lin S.-J., Vecchi G.A., (2010). “Simulations of global hurricane climatology, interannual variability, and response to global warming using a 50km resolution GCM”. *Journal of Climate*. 22, pp: 6653–6678

## **ANEXO 1. MODELO DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA POR VIENTOS HURACANADOS**

### **Introducción**

La generación de huracanes está asociada con la incidencia de la radiación solar sobre el planeta, y los procesos climáticos que ésta induce. La atmósfera, cuyo espesor medio es de 130 km, está conformada por aire de distintas densidades, según su altura y posición en la superficie terrestre. El aire seco está compuesto por nitrógeno 78%, oxígeno 20%, neón y ozono menos del 1%, polvo y otros gases el 1% restante. Debido a los cambios térmicos se pueden presentar moléculas de agua en la composición del aire que cambian su densidad. La densidad del aire tiene un valor medio de  $1.2 \text{ kg/m}^3$  pero puede tener variaciones de hasta el 20% según la época del año y la latitud del sitio.

En la superficie terrestre se desarrollan procesos circulatorios de las masas de aire, debidos a la variación de la temperatura atmosférica con la altura, también denominada gradiente térmico. Esto induce intercambios termodinámicos entre las zonas más calientes y las más frías, para establecer el equilibrio. El aire caliente se desplaza hacia los polos y el aire frío hacia el ecuador. De este modo, las masas de aire nivelan y suavizan el clima terrestre y establecen los principios de la circulación general. Al presentarse el movimiento de aire caliente hacia las partes altas de la atmósfera se genera un centro de baja presión, con lo que se pierde o reduce el calor de la atmosfera.

En un centro de baja presión el viento tiende a desplazarse hacia el centro del sistema, en donde se acumula para luego ascender verticalmente. Al elevarse, la masa de aire se expande, pierde energía y reduce el calor. Si se dan las condiciones de temperatura y humedad necesarias, el vapor de agua del aire se condensa generando nubes.

Las depresiones tropicales pueden o no desarrollarse en eventos relevantes dependiendo de las condiciones físicas y ambientales dominantes en la zona y el momento en que se generan. Cuando estas depresiones tropicales embrionarias encuentran las condiciones apropiadas, pueden desarrollarse y generar tormentas tropicales o huracanes. Todos estos eventos se originan bajo condiciones meteorológicas similares y exhiben el mismo ciclo de vida. Las distintas etapas del

desarrollo de estos sistemas están definidas por la *velocidad sostenida* de los vientos, es decir los niveles de velocidad del viento y la presión atmosférica que se mantienen por tiempos superiores a un minuto, cerca del centro del sistema. En las etapas formativas, la circulación cerrada isobárica se conoce como depresión tropical. Si la velocidad sostenida de los vientos excede los 63 km/h (39 mph), se convierte en una tormenta tropical. En esta etapa el sistema ya está en capacidad de producir algún tipo de peligro. Cuando los vientos exceden los 119 km/h (74 mph), el sistema se clasifica en un huracán, la forma más severa de los ciclones tropicales. El decaimiento del sistema ocurre cuando la tormenta llega a aguas no tropicales o cruza una masa de tierra. Si se desplaza hacia un ambiente no tropical, se le conoce como una tormenta subtropical ó depresión subtropical. Si sucede desplazamiento sobre la tierra, los vientos se desaceleran y nuevamente se convierten en una tormenta y depresión tropical, hasta disiparse completamente.

### **Procedimiento general**

Los pasos principales para el desarrollo del modelo de amenaza de huracán en Guatemala son los siguientes:

- (1) Generar un conjunto de eventos estocásticos basados en la información histórica para la cuenca del Atlántico Norte. El conjunto de eventos consiste en miles de trayectorias de huracanes con parámetros definidos tales como intensidad, tamaño y forma descritos a intervalos regulares a lo largo de la trayectoria del mismo. Se identifica la trayectoria media y la velocidad traslacional de la tormenta, al igual que la distribución alrededor de estos valores medios. Cada evento tiene su propia frecuencia de ocurrencia.
- (2) Los eventos estocásticos se generan mediante simulación utilizando una técnica “random-walk”. Con esta metodología se pueden generar varios miles de trayectorias. Cada trayectoria simulada es diferente de cada otra trayectoria simulada o histórica pero el conjunto de eventos simulados mantiene las mismas propiedades estadísticas del conjunto de eventos históricos.

- (3) Una vez que la trayectoria queda definida, se adiciona a ésta la información de presión central y velocidad ciclostrofica utilizando relaciones estadísticas.
- (4) Se calculan y generan mapas de amenaza de velocidad de vientos. Para cada punto de la malla de cálculo se determina la velocidad máxima del viento para ráfagas de 5 segundos.
- (5) La información de las trayectorias se convierte a velocidades de viento continental empleando el siguiente procedimiento:
  - (a) Calcular el campo de gradientes de viento (el viento a una altura suficiente sobre el nivel del terreno para no reflejar los efectos de la superficie). El gradiente de viento en cualquier punto de interés es función de la distancia desde el centro de la tormenta, la dirección a la localización relativa a la trayectoria, la presión central, la velocidad de avance de la tormenta, la relación al máximo viento y los parámetros de forma del campo de viento.
  - (b) Utilizar la rugosidad superficial y la topografía para calcular la velocidad de viento de ráfagas pico para 5 segundos en el sitio de interés.

El proceso anterior se repite para cada intervalo de tiempo a lo largo de la trayectoria reteniendo el viento máximo para cada ubicación.

### **Simulación de huracanes**

El registro de huracanes que han afectado la región centroamericana data desde finales del siglo XIX. Sin embargo, no es sino hasta mediados del siglo XX que se dispone de registros de sus trayectorias completas y de parámetros indicativos de su severidad, tales como la presión barométrica en el ojo o la velocidad ciclostrofica. En estas condiciones, la base de datos útiles de huracanes es limitada por lo que fue necesario extenderla, mediante la generación (simulación) de huracanes artificiales.

Para generar huracanes artificiales, se utiliza el método de perturbar las trayectorias de huracanes reales que hayan sido correcta y completamente registrados.

Para simular la trayectoria del huracán artificial se debe precisar la posición mediante sus coordenadas geográficas de longitud y latitud,  $x_s(t_k)$  y  $y_s(t_k)$ , respectivamente, en cada instante de tiempo  $k$ . El proceso de simulación se debe realizar mediante la siguiente expresión, aplicable al caso de la longitud, y con un procedimiento similar para el caso de la latitud:

$$x_s(t_{k+1}) = x_s(t_k) + \Delta X_{k,k+1} + e \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde  $x_s(t_{k+1})$  es la longitud en el instante  $k+1$ ,  $x_s(t_k)$  es la longitud en el instante  $k$ ,  $\Delta X_{k,k+1}$  es el incremento observado entre los instantes  $k$  y  $k+1$  y  $e$  es una variable aleatoria con distribución normal de media cero y desviación estándar  $\sigma = 0.5$ . Este valor de desviación se obtuvo a partir de todos los huracanes perturbados y de comparar los resultados arrojados por el modelo de viento con los datos de todas las estaciones climatológicas disponibles.

### **Modelación del viento**

Para determinar la velocidad máxima en el sitio de interés asociada a cada huracán se emplea un modelo paramétrico de viento que depende de la posición del ojo del huracán, de la presión central,  $P_0$  [mb], y del radio ciclostrofico,  $R$  [km]. Los dos primeros parámetros se encuentran en los boletines climatológicos. El radio ciclostrofico se calcula como:

$$R = 0.4785P_0 - 413.01 \quad (\text{Ec. 3})$$

Hasta 1979 en algunos reportes meteorológicos se omite la presión central. En los casos de huracanes donde no se reportó la presión central en los boletines se emplearon las siguientes ecuaciones para su cálculo:

$$P_0 = 1019.08 - 0.182V - 0.0007175V^2 \quad (\text{Océano Atlántico}) \quad (\text{Ec. 4})$$

$$P_0 = 1017.45 - 0.1437V - 0.00088V^2 \quad (\text{Océano Pacífico}) \quad (\text{Ec. 5})$$

En donde  $V_v$  [km/h] es la velocidad máxima de viento sostenida, contenida en los boletines meteorológicos. Es importante hacer notar que estas relaciones sólo son válidas para presiones centrales superiores a 888 milibares.

El modelo paramétrico calcula, primero, para un huracán en movimiento, la velocidad sostenida del viento, promediada cada ocho minutos  $V_m$  [km/h] en el sitio de interés ubicado a la distancia  $r$  [km] del centro del huracán, evaluada a diez metros sobre el nivel del mar:

$$V_m = 0.886(F_v U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)) \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde  $V_F$  [km/h] es la velocidad de desplazamiento del huracán,  $\theta + \beta$  es el ángulo formado por la dirección de desplazamiento del huracán y el punto de interés a la distancia  $r$ ,  $U_R$  [km/h] es el máximo gradiente de vientos para un huracán en estado estacionario que se calcula como

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_o} - 0.5fR \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde  $P_N$  es la presión normal (igual a 1013 mb) y  $f$  es el parámetro de la fuerza de Coriolis,

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (\text{Ec. 8})$$

donde  $\omega \approx 0.2618 \text{ rad} / \text{hr}$  es la velocidad angular de la tierra, y  $\phi$  es la latitud,

$$F_v = Ur/U_R \quad (\text{Ec. 9})$$

es un factor de amortiguamiento o la relación de la velocidad de viento a la distancia  $r$ , con el máximo gradiente de vientos (en la pared del huracán), y se aproxima mediante el siguiente polinomio:



$$\log_{10}(F_V) = aX + bX^2 + cX^3 + dX^4 \quad (\text{Ec. 10})$$

donde

$$X = \log_{10}(r/R) \quad (\text{Ec. 11})$$

ya,  $b$ ,  $c$  y  $d$  son coeficientes que se obtienen de la Tabla 1, y están en función de  $X$  y del número de Coriolisciclostrófico,

$$Nc = \frac{fR}{U_R} \quad (\text{Ec. 12})$$

**Tabla 1**  
**Parámetros a, b, c y d para el cálculo de la expresión (37)**

	$X \leq 0$	$X > 0$	
		$Nc \leq 0.005$	$Nc > 0.005$
$a$	-0.233	$0.033 - 16.1Nc + 161.9Nc^2$	$-0.175 - 0.76Nc + 11.7Nc^2 - 28.1Nc^3 + 17Nc^4$
$b$	-12.91	$-0.43 + 38.9Nc - 316Nc^2$	$0.235 + 2.71Nc - 67.6Nc^2 + 189Nc^3 - 155Nc^4$
$c$	-19.38	$0.113 - 28.6Nc + 71.1Nc^2$	$-0.468 - 9Nc + 87.8Nc^2 - 224Nc^3 + 183Nc^4$
$d$	-8.311	$1.818Nc + 80.6Nc^2$	$0.082 + 3.33Nc - 26Nc^2 + 638Nc^3 - 514Nc^4$

El modelo descrito previamente nos permite calcular la velocidad de viento a 10 m sobre la superficie del mar y promediada a cada ocho minutos, por lo que es necesario realizar correcciones para estimar la velocidad de viento promediada cada minuto ( $V_c$  [km/h]), tal como se reporta en los boletines meteorológicos. Para ello se utilizan las siguientes expresiones:

$$V_c = 0.0012V_m^2 + 1.1114V_m \quad (\text{Océano Atlántico}) \quad (\text{Ec. 13})$$

$$V_c = 0.002V_m^2 + 0.9953V_m \quad (\text{Océano Pacífico}) \quad (\text{Ec. 14})$$

Con el objetivo de tomar en cuenta la variación de la velocidad de viento en tierra, se calculó una expresión que permite reproducir la velocidad de viento registrada en las estaciones meteorológicas (promediada a cada 5 segundos) a partir de la velocidad de viento calculada con el modelo paramétrico. La expresión obtenida es la siguiente:

$$V_v = V_c \exp(-0.0043r) \quad (\text{Ec. 15})$$

Para calcular la velocidad de viento para una ubicación tomando en cuenta el efecto de la fricción con la superficie del terreno y la topografía local, se emplea la siguiente expresión

$$V = F_T F_\alpha V_v \quad (\text{Ec. 16})$$

Los factores de superficie del terreno y topografía local se definen como se encuentra descrito en la sección 2.2.1 de este informe.

## ANEXO 2. PROXI DE EXPOSICIÓN DE GUATEMALA

Población	
Urbana	5,940,957 Hab
Rural	6,934,997 Hab
<b>Total</b>	<b>12,875,954 Hab</b>

	Unidad	Valor	Valor per capita	1/PIB per Capita
<b>Área Construida</b>				
Área construida Urbana	m <sup>2</sup>	193,554 x10 <sup>3</sup>	32.6	-
Densidad Construcción Urbana	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> terreno urbano	0.18	-	-
<b>Valoración Infraestructura</b>				
Valor construcciones urbanas	US\$x10 <sup>6</sup>	73,375	5,699	1.06
Valor construcciones rurales	US\$x10 <sup>6</sup>	-	-	-
Infraestructura Urbana	US\$x10 <sup>6</sup>	1,750	295	0.05
Infraestructura Nacional	US\$x10 <sup>6</sup>	23,894	1,856	0.34
<b>Total Infraestructura país</b>	<b>US\$x10<sup>6</sup></b>	<b>99,019</b>	<b>7,690</b>	<b>1.42</b>

### VALORES EN EXPOSICIÓN

[Índice General](#)

Sector	Unidad	Unidad per capita país	Unidad per capita sector	Valor	Valor per capita país
<b>Construcciones Urbanas</b>	<b>[m<sup>2</sup>x10<sup>3</sup>]</b>	<b>[m<sup>2</sup> / Hab]</b>		<b>[US\$x10<sup>6</sup>]</b>	<b>[US\$ / Hab]</b>
Residencial PB	22,088	1.7	3.72 [Hab Urb]	2,650	206
Residencial PM	70,736	5.5	11.91 [Hab Urb]	24,501	1,903
Residencial PA	15,408	1.2	2.59 [Hab Urb]	9,721	755
Comercial	34,560	2.7	20 m <sup>2</sup> /FL	12,735	989
Industrial	27,043	2.1	50 m <sup>2</sup> /FL	16,180	1,257
Salud Privada	37	0.0	2.9 m <sup>2</sup> /1000Hab	26	2
Educación Privada	6,007	0.5	2.0 m <sup>2</sup> /Est	2,280	177
Salud Pública	44	0.0	3.4 m <sup>2</sup> /1000Hab	21	2
Educación Pública	16,460	1.3	5.4 m <sup>2</sup> /Est	4,858	377
Gobierno	1,173	0.1	5 m <sup>2</sup> /EP	405	31
<b>Total</b>	<b>193,554</b>	<b>15.0</b>		<b>73,375</b>	<b>5,699</b>

Sector	Ocupación Día	Ocupación Noche
<b>Construcciones Urbanas</b>	<b>[Hab]</b>	<b>[Hab]</b>
Residencial PB	83,180	1,663,607
Residencial PM	314,897	6,297,940
Residencial PA	56,211	1,124,211
Comercial	4,450,451	1,668,919
Industrial	3,929,647	2,183,137
Salud Privada	10,467	10,467
Educación Privada	1,247,239	0
Salud Pública	11,134	11,134
Educación Pública	2,954,898	0
Gobierno	132,485	0
<b>Total</b>	<b>13,190,610</b>	<b>12,959,414</b>

Sector	Unidad	Unidad per capita Urbano	Valor	Valor per capita Urbano	Valor por Unidad
<b>Infraestructura Urbana</b>			<b>[US\$x10<sup>6</sup>]</b>	<b>[US\$ / Hab]</b>	
SubEst Eléctricas	-	-	284	48	-
SubEst Comunicaciones	-	-	30	5	-
Presas abastecimiento	-	-	71	12	-
Plantas y tanques	-	-	97	16	-
Red Acueducto	-	-	152	26	-
Red Alcantarillado	-	-	170	29	-
Red Gas	-	-	52	9	-
Aeropuertos (Terminal)	170,000 m <sup>2</sup>	28.6	258	43	1,518 US / m <sup>2</sup>
Aeropuertos (Pistas)	15 km	0.0	86	15	6 USx10 <sup>6</sup> / km
Puertos (Bodegas)	104,199 m <sup>2</sup>	17.5	80	13	765 US / m <sup>2</sup>
Puertos (Muelle)	87,765 m <sup>2</sup>	14.8	156	26	1,781 US / m <sup>2</sup>
Puentes Urbanos	157 und	0.0	314	53	2 US x10 <sup>6</sup> / und
<b>Total</b>			<b>1,750</b>	<b>295</b>	

Sector	Unidad	Valor	Valor per capita Nacional	Valor por Unidad
<b>Infraestructura Nacional</b>	<b>[km]</b>	<b>[US\$x10<sup>6</sup>]</b>	<b>[US\$ / Hab]</b>	<b>[US\$x10<sup>6</sup> / km]</b>
Red vial principal (Vías)	6,418	16,687	1,296	2.6
Red vial secundaria (Vías)	5,127	1,666	129	0.3
Red vial principal (Puentes)	47	943	73	20
Red vial secundaria (Puentes)	5	82	6	15
Hidroeléctricas (Presas)	-	697	54	-
Hidroeléctricas (Casas de Maquinas)	-	366	28	-
Plantas Térmicas	-	754	59	-
Plantas Geotérmicas	-	26	2	-
Distribución energética (Subestaciones)	-	101	8	-
Distribución energética (Redes)	-	101	8	-
Comunicaciones (Líneas Fijas)	-	14	1	-
Comunicaciones (Líneas Móviles)	-	129	10	-
Hidrocarburos Derivados	-	2,095	163	-
Hidrocarburos (Gas)	-	232	18	-
<b>Total</b>		<b>23,894</b>	<b>1,856</b>	

### **ANEXO 3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS PROBABILISTA DEL RIESGO**

#### **Generalidades**

El análisis probabilista del riesgo tiene como objetivo fundamental determinar las distribuciones de probabilidad de las pérdidas que pueden sufrir en lapsos dados los activos expuestos, como consecuencia de la ocurrencia de amenazas naturales, integrando de manera racional las incertidumbres que existen en las diferentes partes del proceso. La pregunta básica que el análisis probabilista de riesgos debe contestar es: dado que se tiene un conjunto de activos expuestos a los efectos de una o varias amenazas naturales, ¿con qué frecuencia se presentarán pérdidas que superen un valor dado?

Puesto que la frecuencia de los eventos catastróficos es particularmente baja, queda descartada la posibilidad de contestar la pregunta anterior formulando modelos puramente empíricos del proceso de ocurrencia de estos eventos. Esto obliga a la construcción de modelos probabilistas como el que aquí se describe.

El procedimiento de cálculo probabilista consiste entonces, en forma resumida, en evaluar las pérdidas en el grupo de activos expuestos durante cada uno de los escenarios que colectivamente describen la amenaza, y luego integrar probabilísticamente los resultados obtenidos utilizando como factores de peso las frecuencias de ocurrencia de cada escenario.

El análisis probabilista de riesgo involucra incertidumbres que no pueden despreciarse y deben propagarse a lo largo del proceso de cálculo. El presente numeral describe las bases generales de cálculo para alcanzar el objetivo planteado.

#### **Análisis del riesgo**

##### *Procedimiento para el análisis del riesgo*

La evaluación de riesgo requiere de tres pasos de análisis, que se describen a continuación:

- *Evaluación de la amenaza:* para cada uno de los peligros considerados, se define un conjunto de eventos, con sus respectivas frecuencias de ocurrencia, que representan de manera integral la amenaza correspondiente. Cada escenario contiene la distribución espacial de parámetros que permiten construir la distribución de probabilidad de las intensidades producidas por su ocurrencia.
  
- *Definición del inventario de elementos expuestos:* debe definirse el inventario de elementos expuestos, el cual debe especificar la localización geográfica del bien expuesto más los siguientes parámetros, que califican el elemento:
  - Valor físico o costo de reposición del bien
  - Valor humano o número de ocupantes estimado
  - Clase estructural a la que pertenece el bien
  
- *Vulnerabilidad de las construcciones:* debe asignarse a cada una de las clases estructurales una función de vulnerabilidad para cada tipo de amenaza. Esta función caracteriza el comportamiento de la construcción durante la ocurrencia de fenómenos amenazantes. Las funciones de vulnerabilidad definen la distribución de probabilidad de las pérdidas como función de la intensidad producida durante un escenario específico. Se definen mediante curvas que relacionan el valor esperado del daño y la desviación estándar del daño con la intensidad del fenómeno.

### *Ecuación básica*

Considerando el objetivo básico del análisis probabilista del riesgo expuesto anteriormente, es necesario plantear entonces la metodología específica de cálculo de las frecuencias de ocurrencia de niveles específicos de pérdidas asociados a los activos expuestos en lapsos determinados de tiempo y ante la ocurrencia de amenazas naturales.

El riesgo por amenazas naturales es comúnmente descrito mediante la llamada *curva de excedencia de pérdidas (loss curve)* que especifica las frecuencias, usualmente anuales, con que

ocurrirán eventos en que se exceda un valor especificado de pérdidas. Esta frecuencia anual de excedencia se conoce también como tasa de excedencia, y puede calcularse mediante la siguiente ecuación, que es una de las múltiples formas que adopta el teorema de la probabilidad total:

$$\nu(p) = \sum_{i=1}^{\text{Eventos}} \Pr(P > p | \text{Evento } i) F_A(\text{Evento } i) \quad (\text{Ec. 17})$$

En la ecuación anterior  $\nu(p)$  es la tasa de excedencia de la pérdida  $p$  y  $F_A(\text{Evento } i)$  es la frecuencia anual de ocurrencia del evento  $i$ , mientras que  $\Pr(P > p | \text{Evento } i)$  es la probabilidad de que la pérdida sea superior a  $p$ , dado que ocurrió el  $i$ -ésimo evento. La suma en la ecuación anterior se hace para todos los eventos potencialmente dañinos. El inverso de  $\nu(p)$  es el periodo de retorno de la pérdida  $p$ , identificado como  $Tr$ .

Como se verá más adelante, la curva de pérdidas contiene toda la información necesaria para describir en términos de probabilidad el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas.

La pérdida  $p$  a que se refiere la ecuación 1 es la suma de las pérdidas que acontecen en todos los bienes expuestos. Conviene hacer notar lo siguiente:

- La pérdida  $p$  es una cantidad incierta, cuyo valor, dada la ocurrencia de un evento, no puede conocerse con precisión. Debe, por tanto, ser vista y tratada como una variable aleatoria y deben preverse mecanismos para conocer su distribución de probabilidad, condicionada a la ocurrencia de cierto evento.
- La pérdida  $p$  se calcula como la suma de las pérdidas que se presentan en cada uno de los bienes expuestos. Cada uno de los sumandos es una variable aleatoria y entre ellos existe cierto nivel de correlación, que debe ser incluido en el análisis.

En vista de la Ecuación 1, la secuencia de cálculo probabilista de riesgo es la siguiente:

1. Para un escenario, determinar la distribución de probabilidades de la pérdida en cada uno de los bienes expuestos.
2. A partir de las distribuciones de probabilidad de las pérdidas en cada bien, determinar la distribución de probabilidad de la suma de estas pérdidas, tomando en cuenta la correlación que existe entre ellas.
3. Un vez determinada la distribución de probabilidad de la suma de las pérdidas en este evento, calcular la probabilidad de que esta exceda un valor determinado,  $p$ .
4. La probabilidad determinada en el inciso anterior, multiplicada por la frecuencia anual de ocurrencia del evento, es la contribución de este evento a la tasa de excedencia de la pérdida  $p$ .

El cálculo se repite para todos los eventos, con lo que se obtiene el resultado indicado por la Ecuación 1.

### *Incertidumbres*

Como se observa en la Ecuación 1, y como se planteó anteriormente, la pérdida que se presenta en un grupo de bienes expuestos durante un escenario es una cantidad incierta que debe ser tratada como variable aleatoria. Generalmente es impráctico determinar de manera directa la distribución de probabilidad de la pérdida en un bien expuesto condicionada a la ocurrencia de un escenario.

Por razones metodológicas, la probabilidad de excedencia de la pérdida  $p$ , dado que ocurrió un evento, suele expresarse de la siguiente manera:

$$\Pr(P > p | Evento) = \int_I \Pr(P > p | I) f(I | Evento) dI \quad (\text{Ec. 2})$$

El primer término del integrando,  $\Pr(P > p/I)$ , es la probabilidad de que la pérdida exceda el valor  $p$  dado que la intensidad local fue  $I$ ; este término, por tanto, toma en cuenta la incertidumbre que hay en las relaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, el término  $f(I/Evento)$  es la densidad de probabilidades de la intensidad, condicionada a la ocurrencia del evento; este término toma en cuenta el hecho de que, dado que ocurrió un evento, la intensidad en el sitio de interés es incierta.

### *Estimadores puntuales del riesgo*

Como se indicó anteriormente, la curva calculada aplicando la Ecuación 1 tiene toda la información necesaria para caracterizar el proceso de ocurrencia de eventos que produzcan pérdidas. Sin embargo, en ocasiones es impráctico utilizar una curva completa, por lo que conviene utilizar estimadores puntuales del riesgo que permitan expresarlo con un solo número. Se presentan a continuación los dos estimadores puntuales más comúnmente utilizados.

- (a) *Pérdida anual esperada* ( $P_{AE}$ ): se trata del valor esperado de la pérdida anual. Es una cantidad importante puesto que indica, por ejemplo, que si el proceso de ocurrencia de eventos dañinos fuera estacionario de aquí a la eternidad, su costo equivaldría a haber pagado la  $P_{AE}$  cantidad anualmente. Por tanto, en un sistema simple de seguro, la pérdida anual esperada sería la prima pura anual justa. La  $P_{AE}$  puede obtenerse por integración de  $\square(p)$  o mediante la siguiente expresión:

$$P_{AE} = \sum_{i=1}^{Eventos} E(P|Evento i)F_A(Evento i) \quad (\text{Ec. 3})$$

- (b) *Pérdida máxima probable* ( $PML$  por las iniciales en inglés de Probable Maximum Loss): se trata de una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno muy largo (o, alternativamente, a una tasa de excedencia muy baja). No existen estándares universalmente aceptados para definir qué quiere decir “poco frecuentemente”. De hecho, la elección de un periodo de retorno u otro para tomar cierta decisión depende de la aversión al riesgo de quien la está tomando. En la industria



aseguradora, por ejemplo, los periodos de retorno utilizados para definir la *PML* varían entre 200 y al menos 1500 años.

#### *Probabilidad de excedencia de valores de pérdida*

La curva de pérdidas,  $\square(p)$ , calculada con la Ecuación 1 indica con que frecuencia ocurrirán eventos que producirán pérdidas iguales o superiores a una dada,  $p$ . Si suponemos que el proceso de ocurrencia de eventos en el tiempo obedece a un proceso de Poisson, entonces es posible calcular la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en un lapso  $T$ , es decir, en los próximos  $T$  años, con la siguiente expresión:

$$Pe(p,T) = 1 - e^{-\nu(p)T} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde  $Pe(p,T)$  es la probabilidad de que la pérdida  $p$  sea excedida en los próximos  $T$  años.

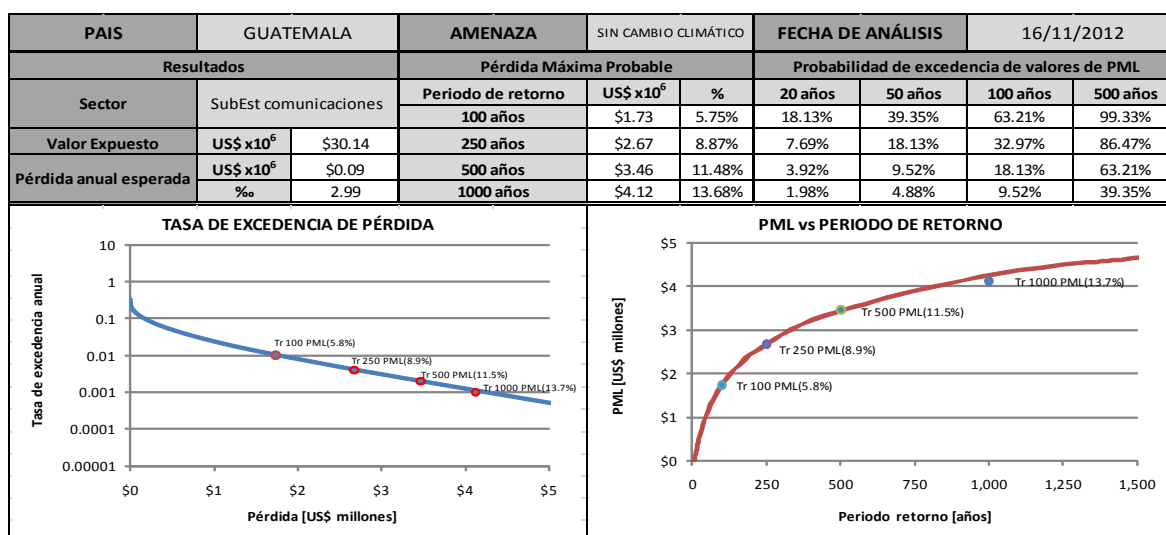
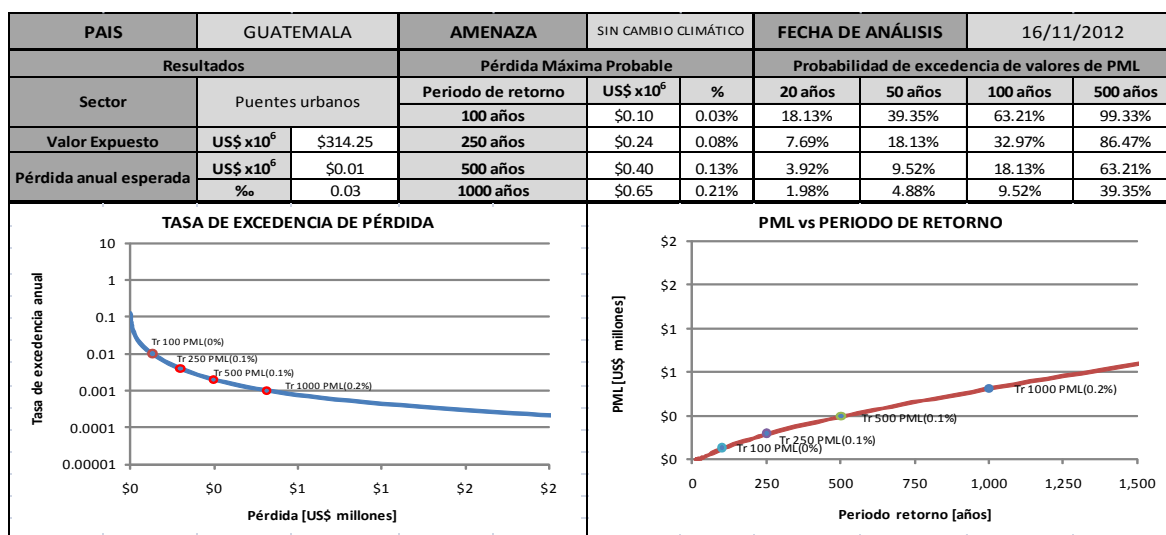
#### *Análisis para un solo escenario*

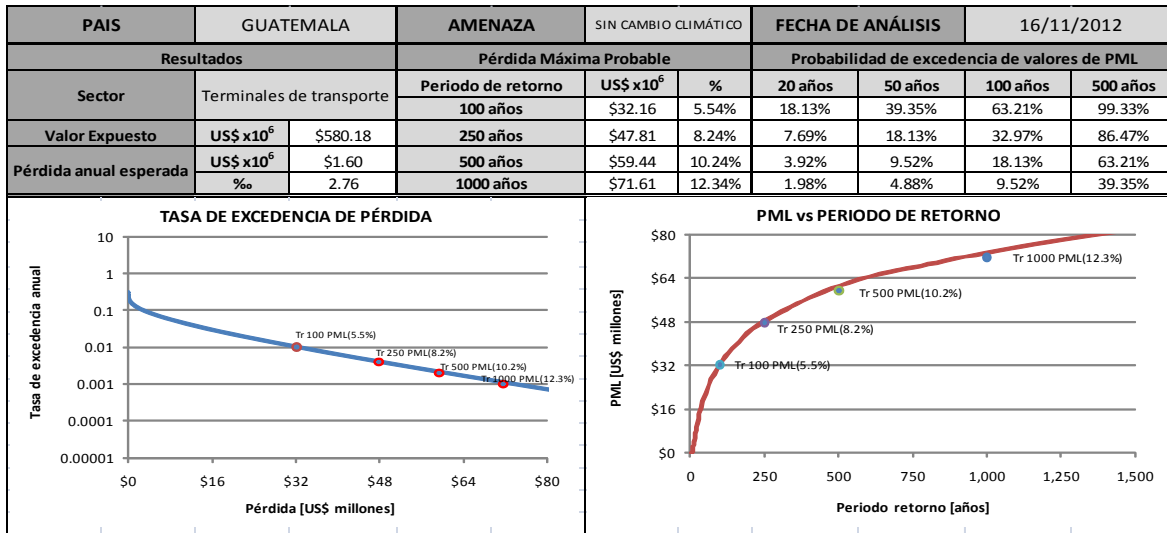
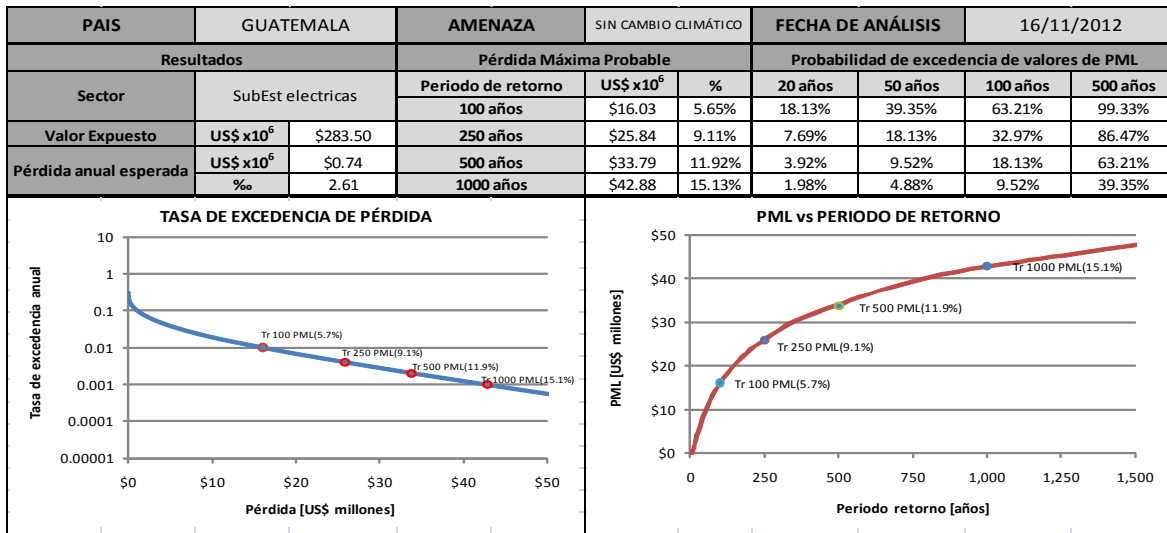
El análisis probabilista de riesgo se realiza normalmente para el conjunto completo de escenarios especificados en las diferentes amenazas. Sin embargo, si así se desea, el análisis puede realizarse para un solo escenario (uno solo de los sumandos en la ecuación 1). Si se hace que la frecuencia anual de ocurrencia de este escenario sea 1, la aplicación de la Ecuación 1 nos conduciría a las probabilidades de excedencia (ya no frecuencias anuales de excedencia) de valores de pérdida  $p$ , dado que el escenario en cuestión ocurrió.

Este caso tiene aplicaciones importantes en el campo de la planeación territorial, ya que sus resultados, mapeados por ejemplo en términos del valor esperado de la pérdida, son fácilmente incorporables en los planes de ordenamiento territorial.

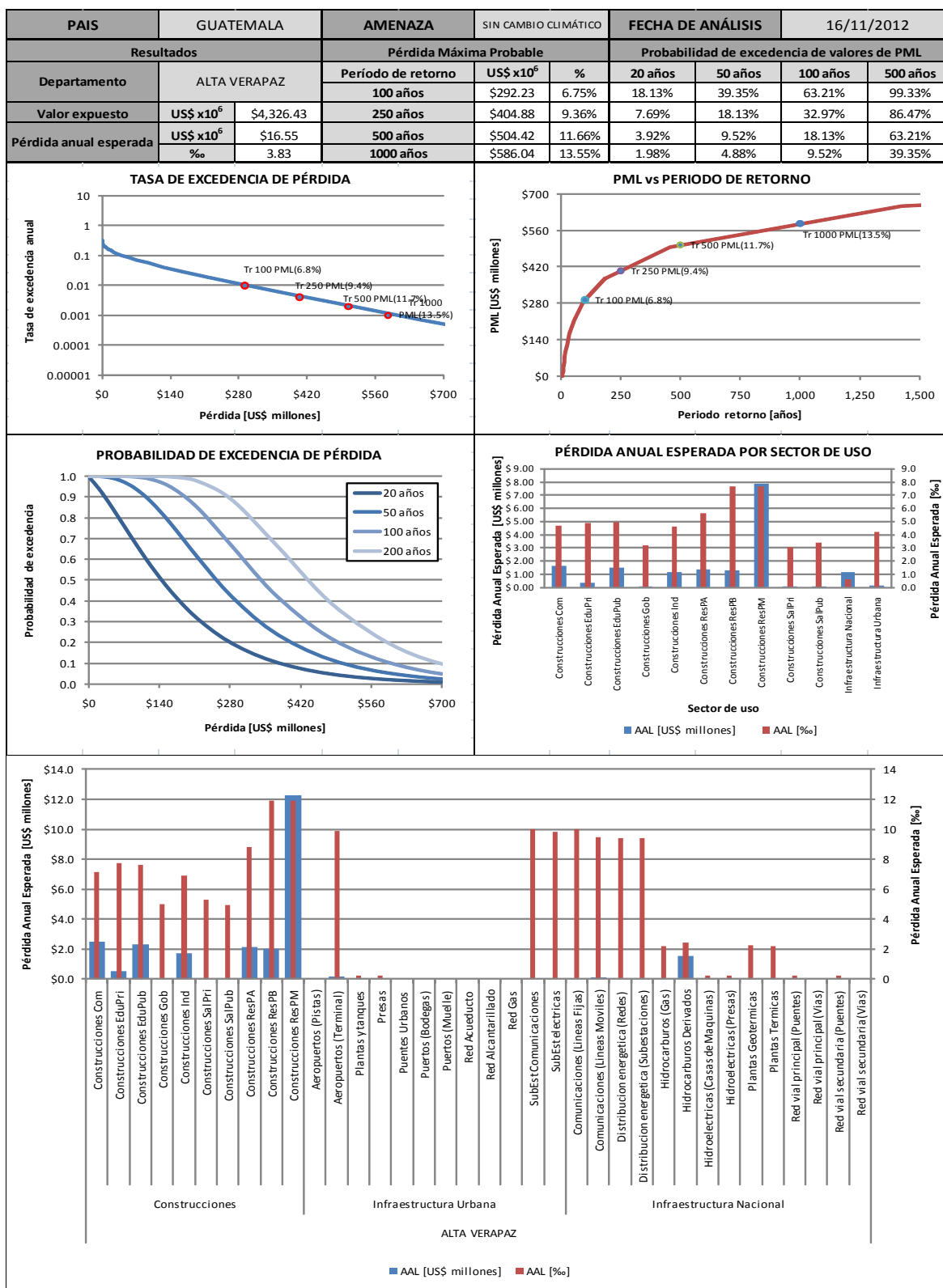
## ANEXO 4. PÉRDIDAS POR SECTOR Y POR DEPARTAMENTO PARA GUATEMALA SIN EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO

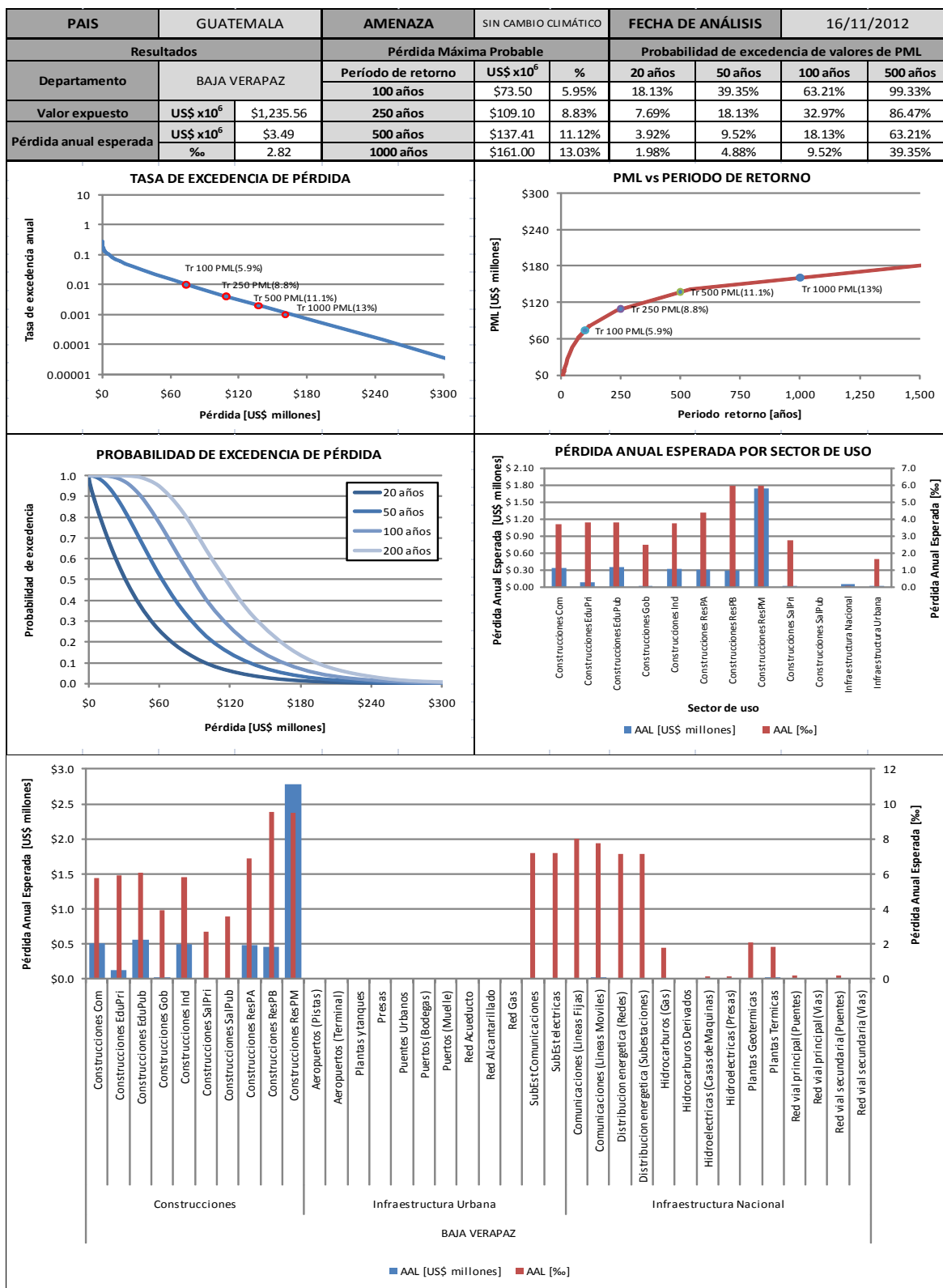
### Pérdidas por sector

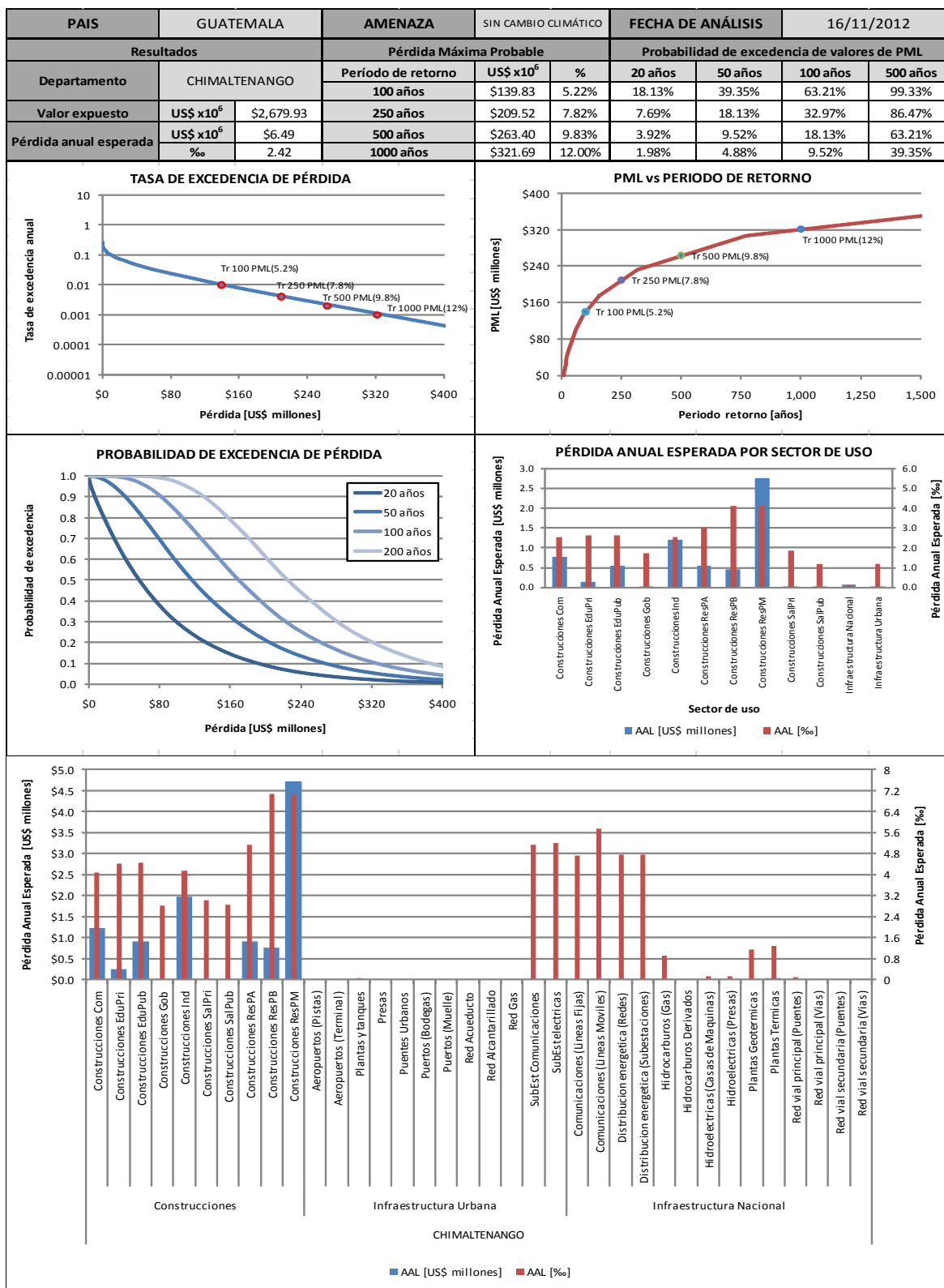


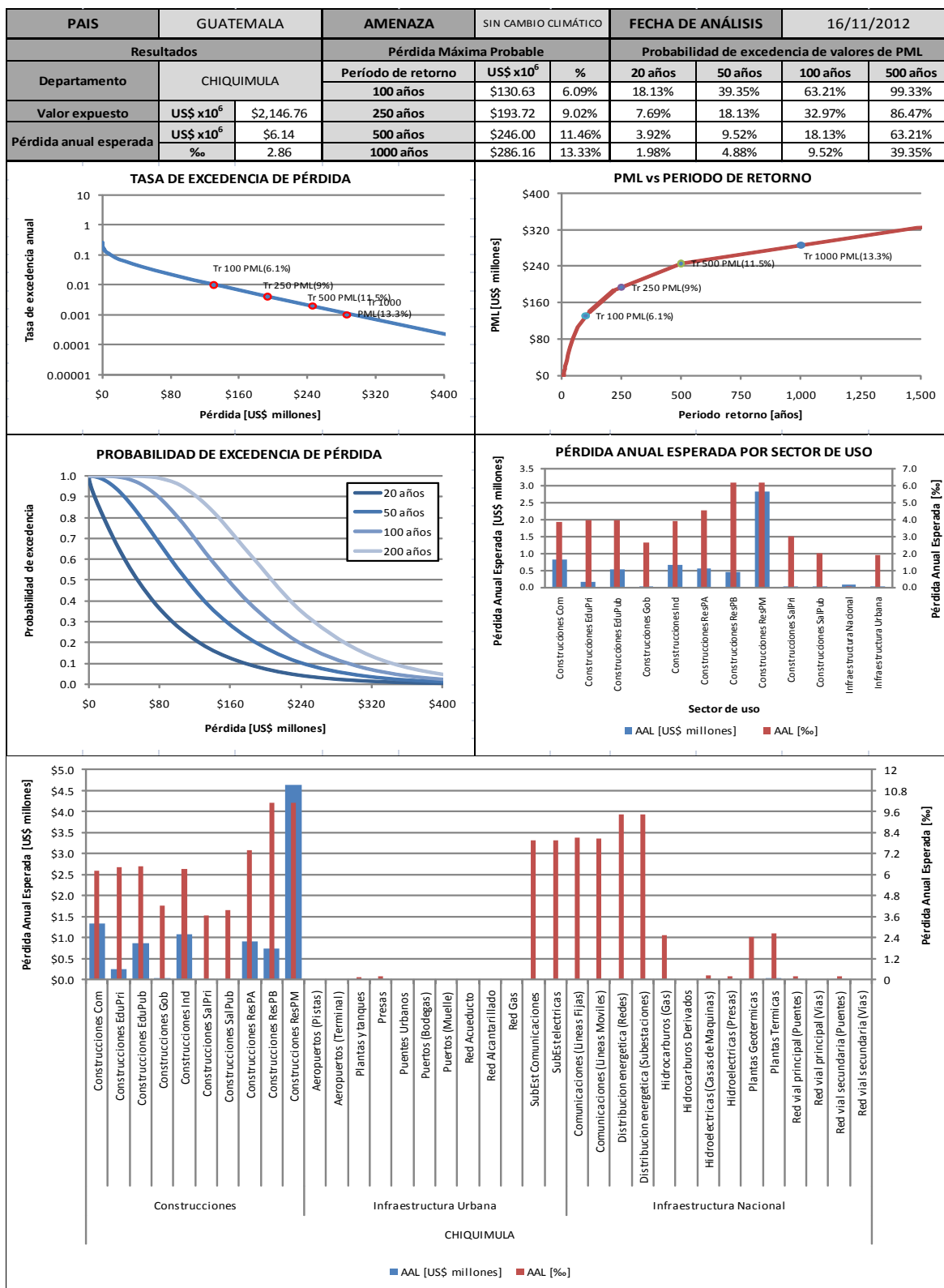


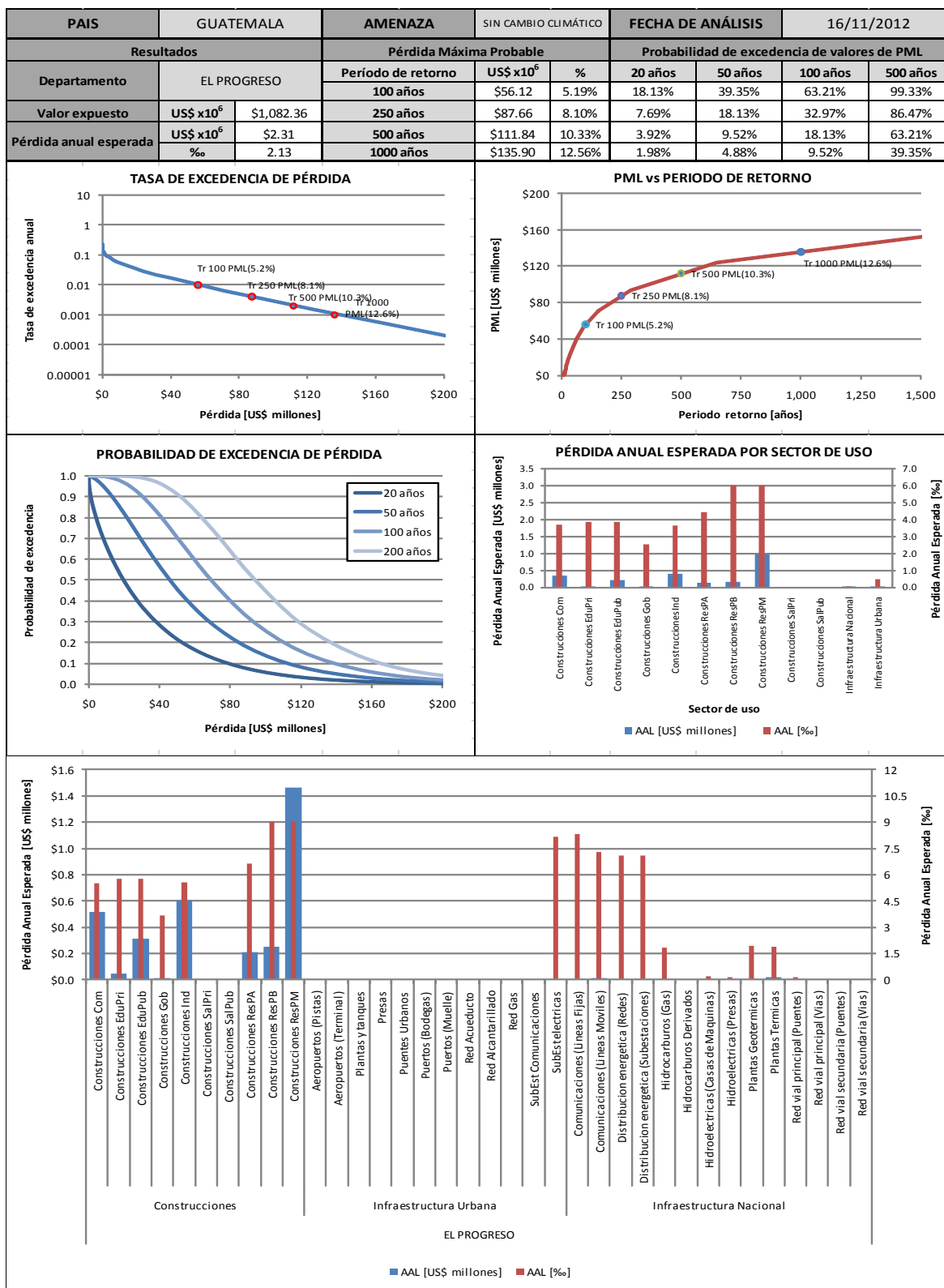
## Pérdidas por departamento



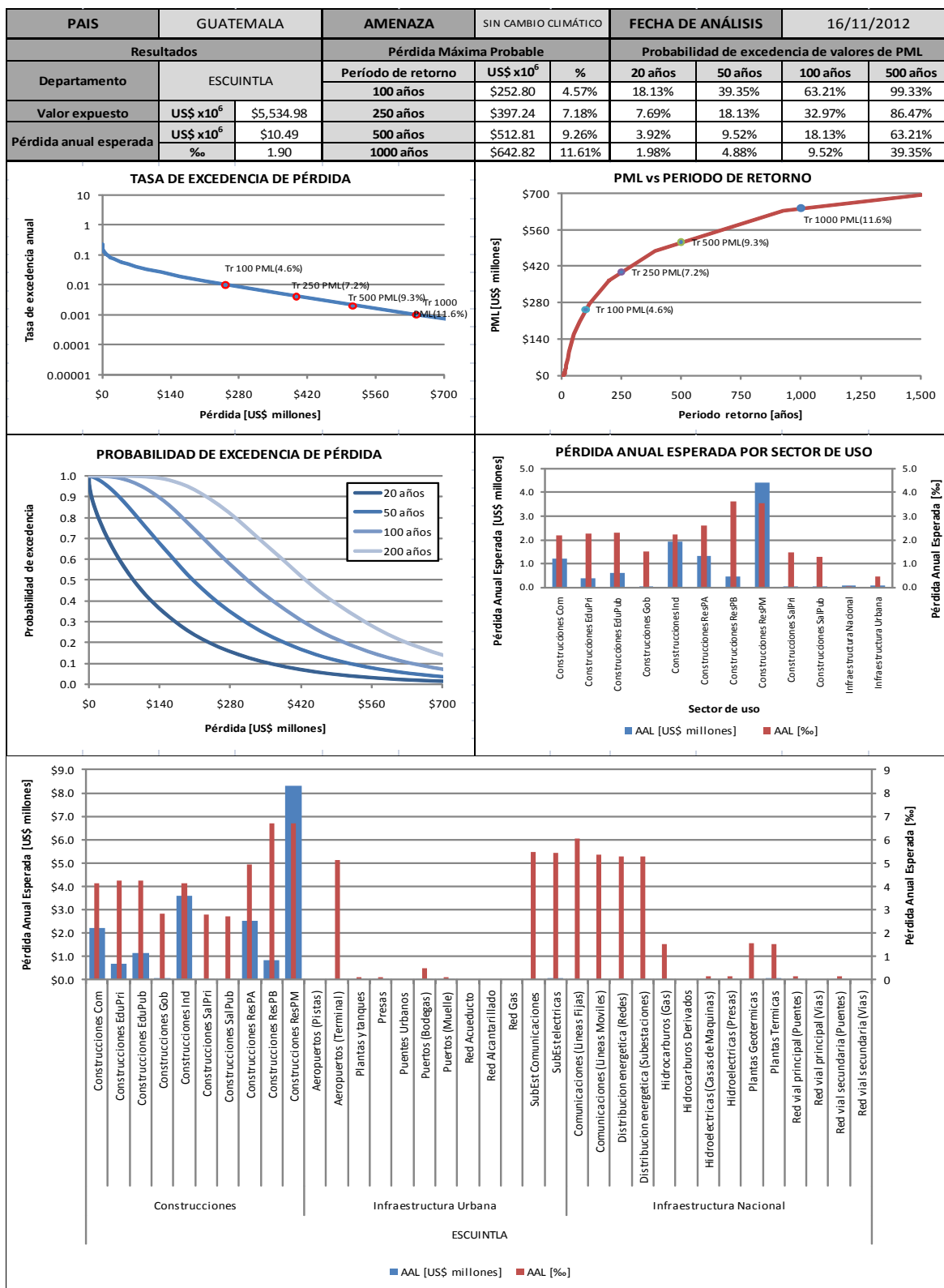


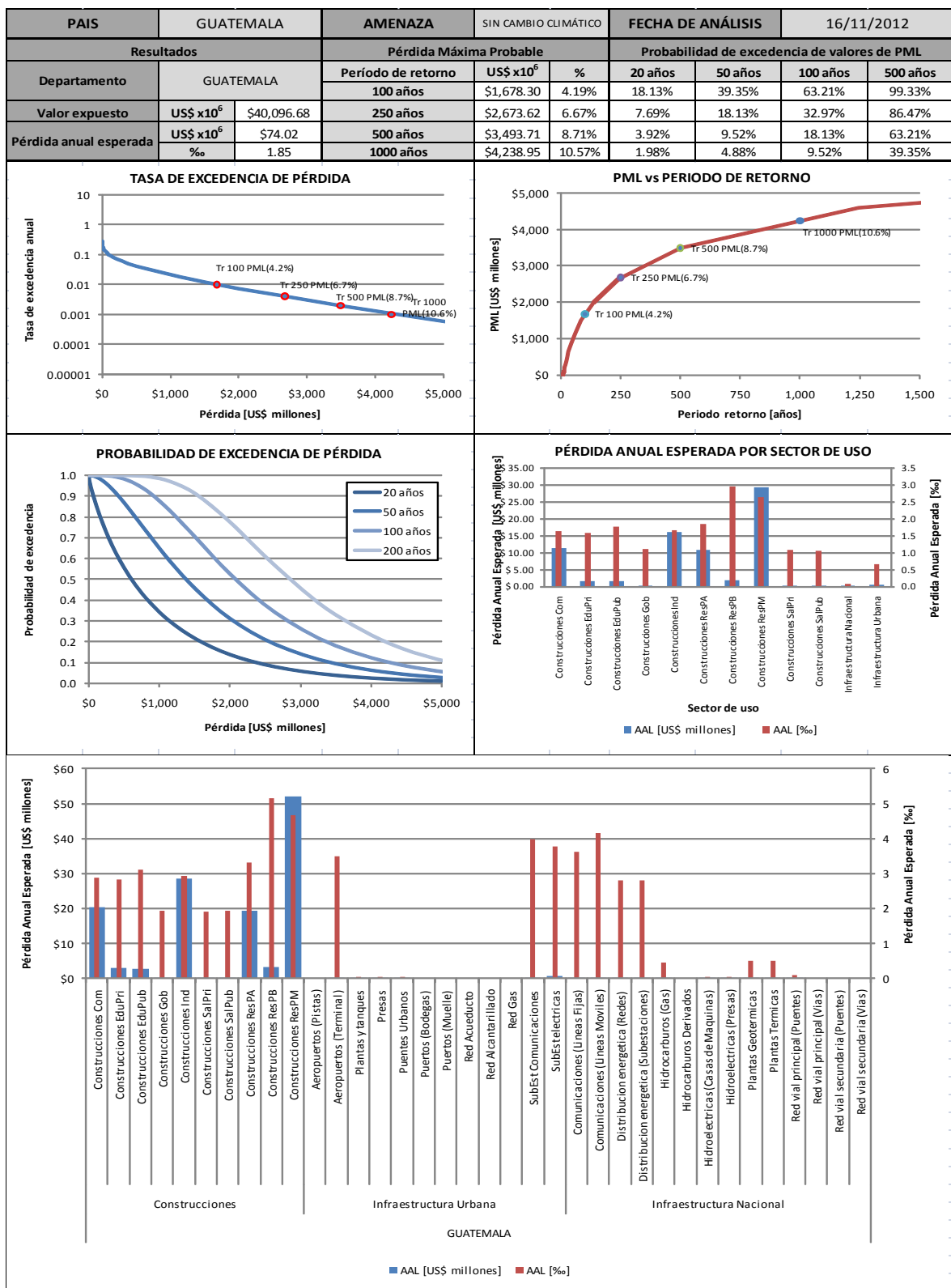


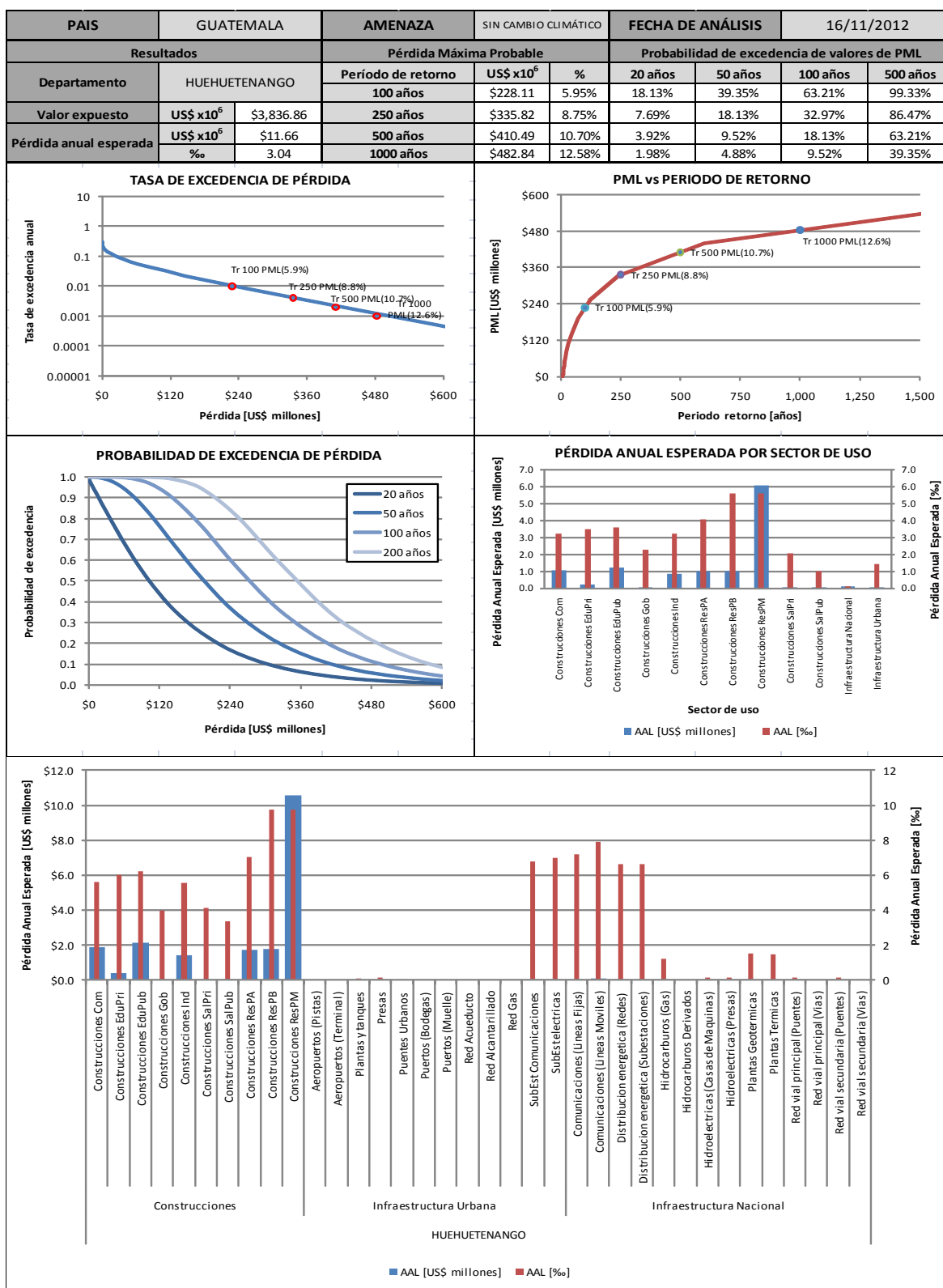


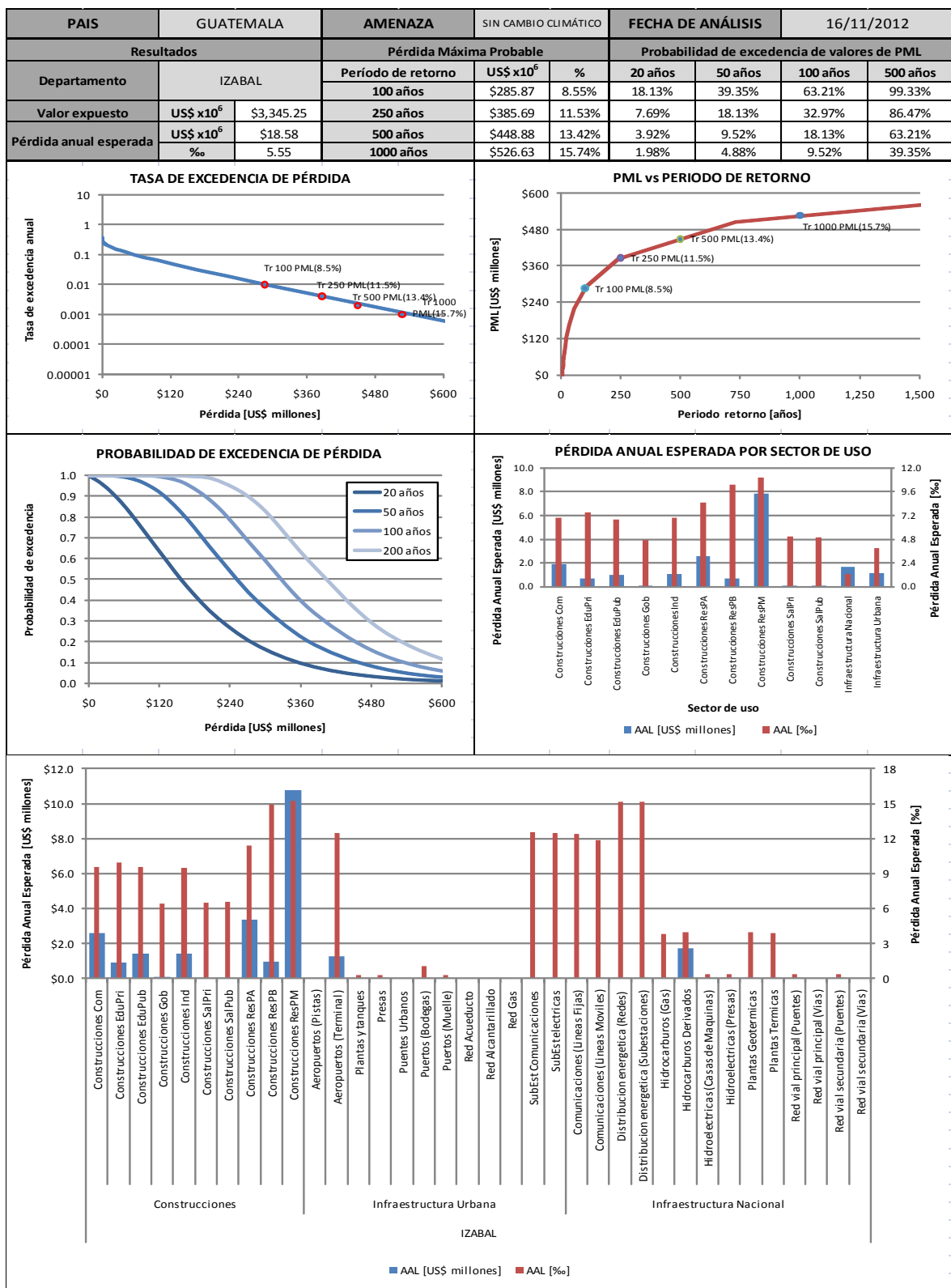


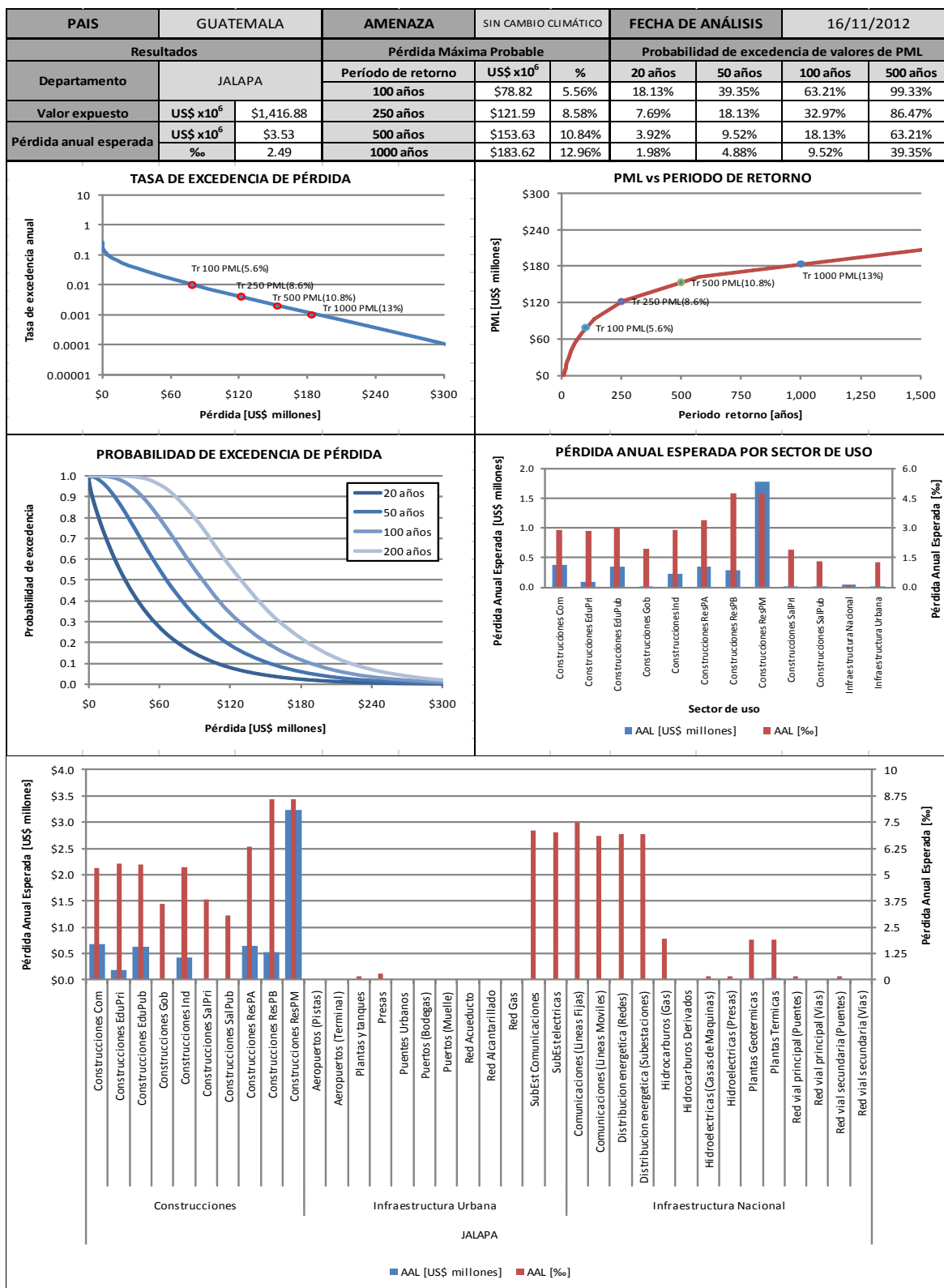


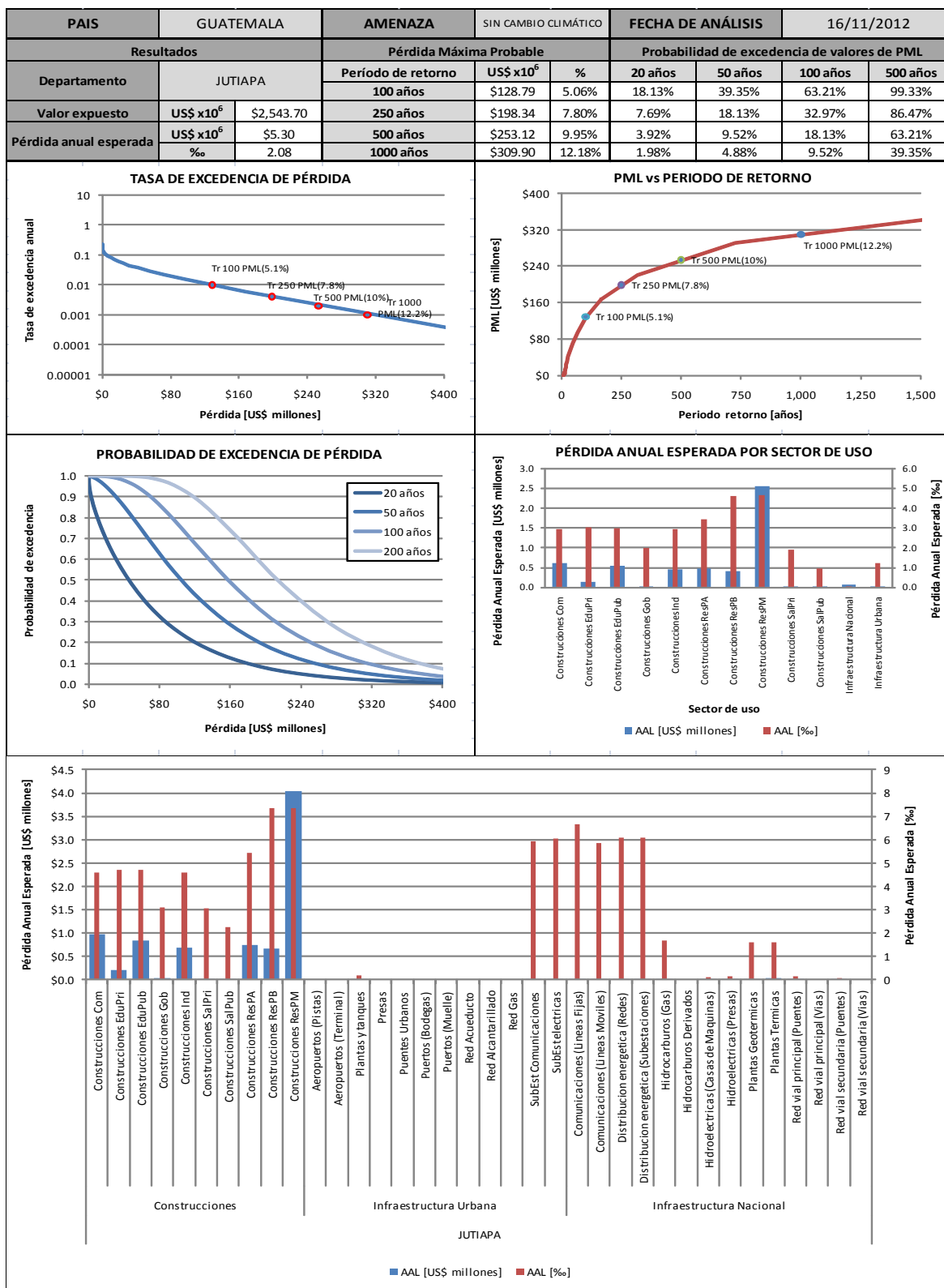


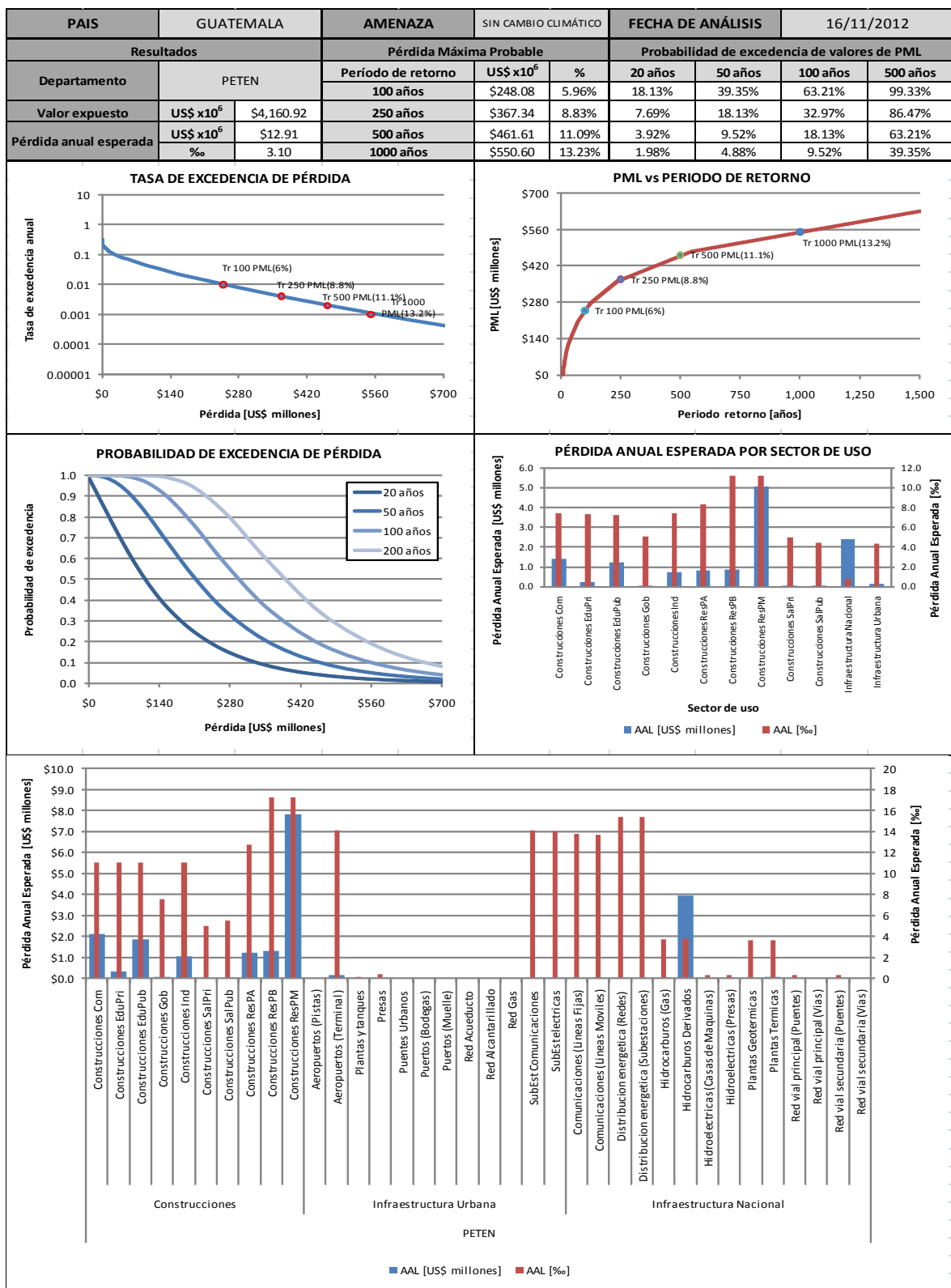


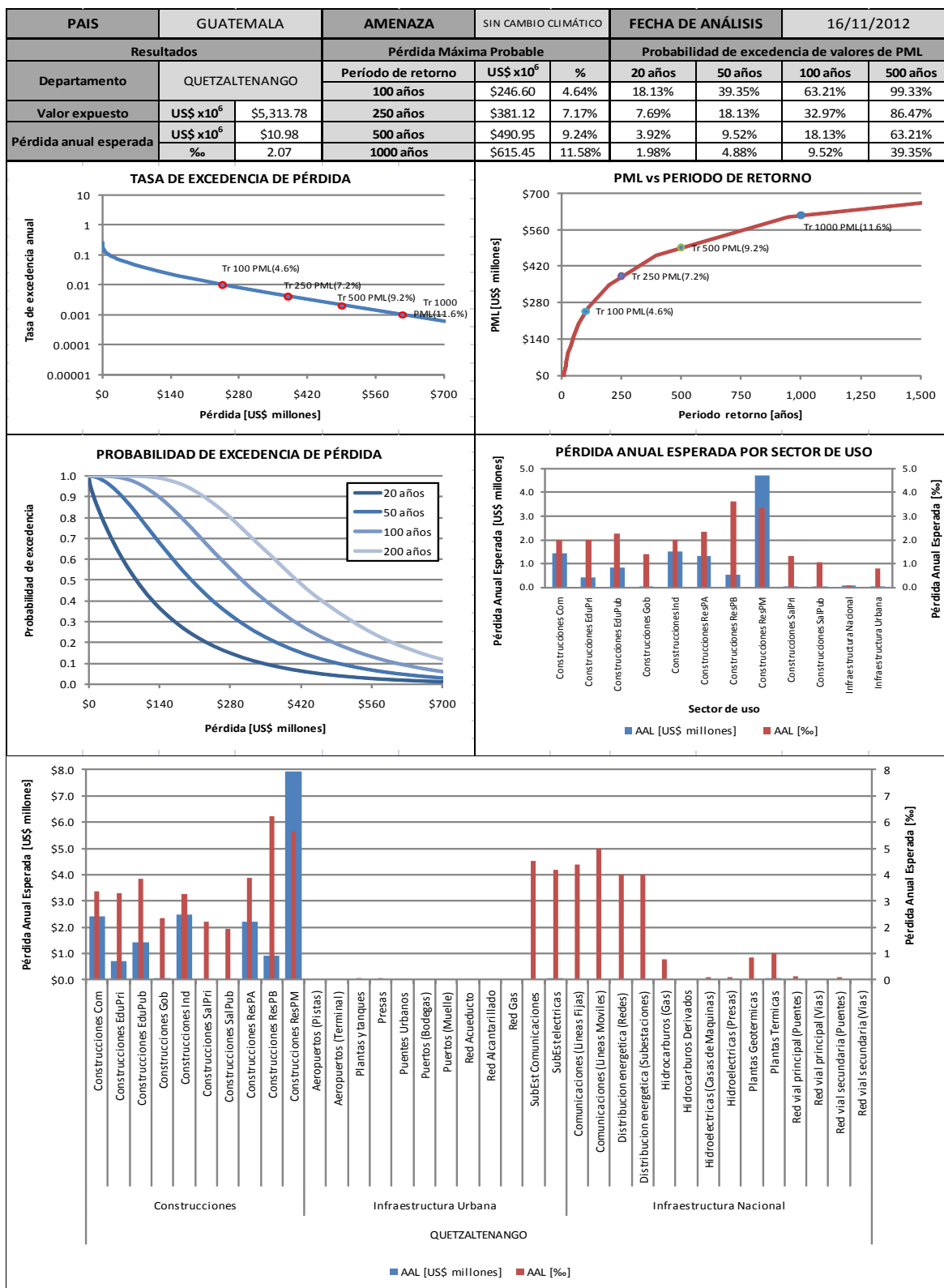




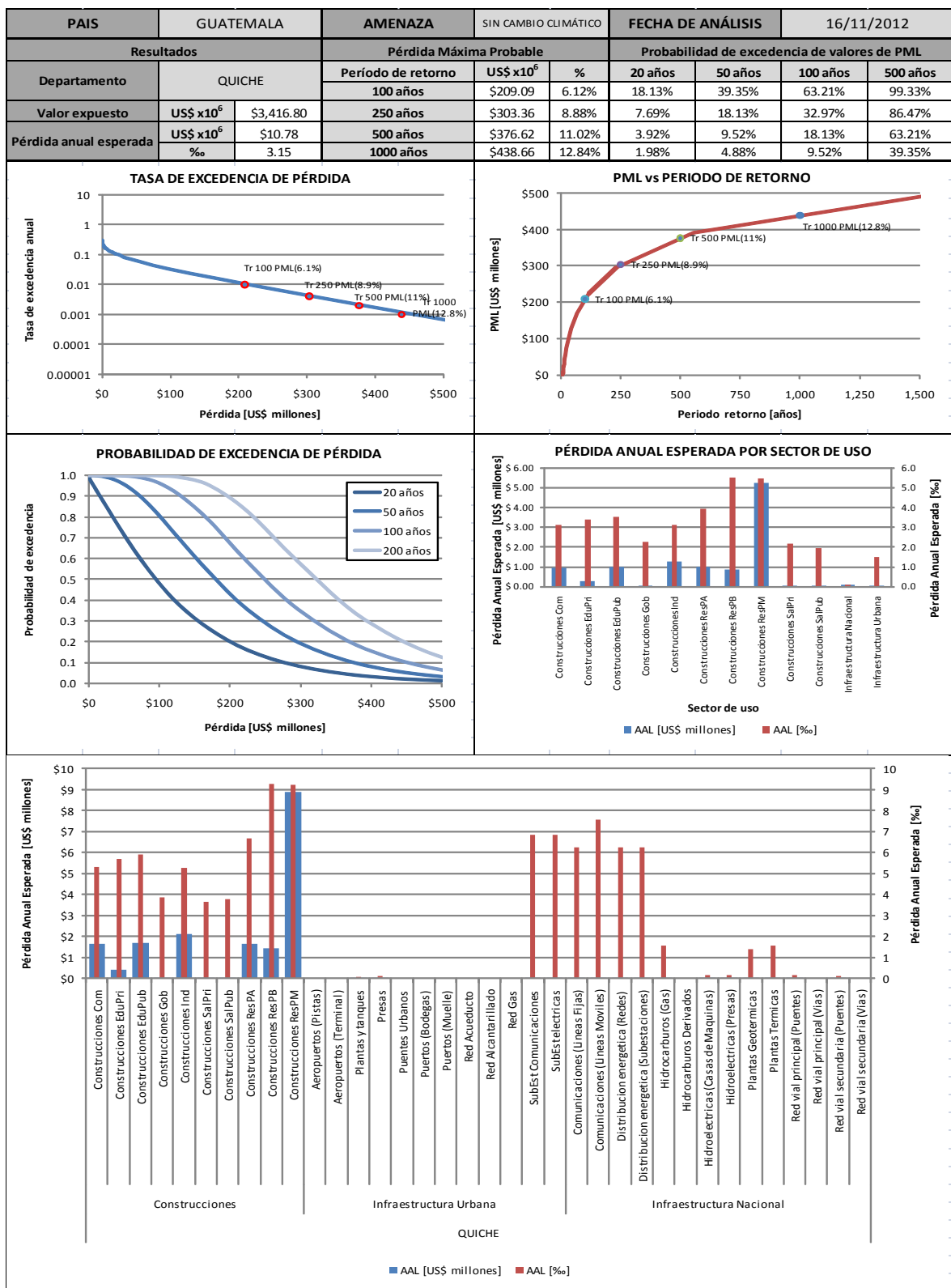


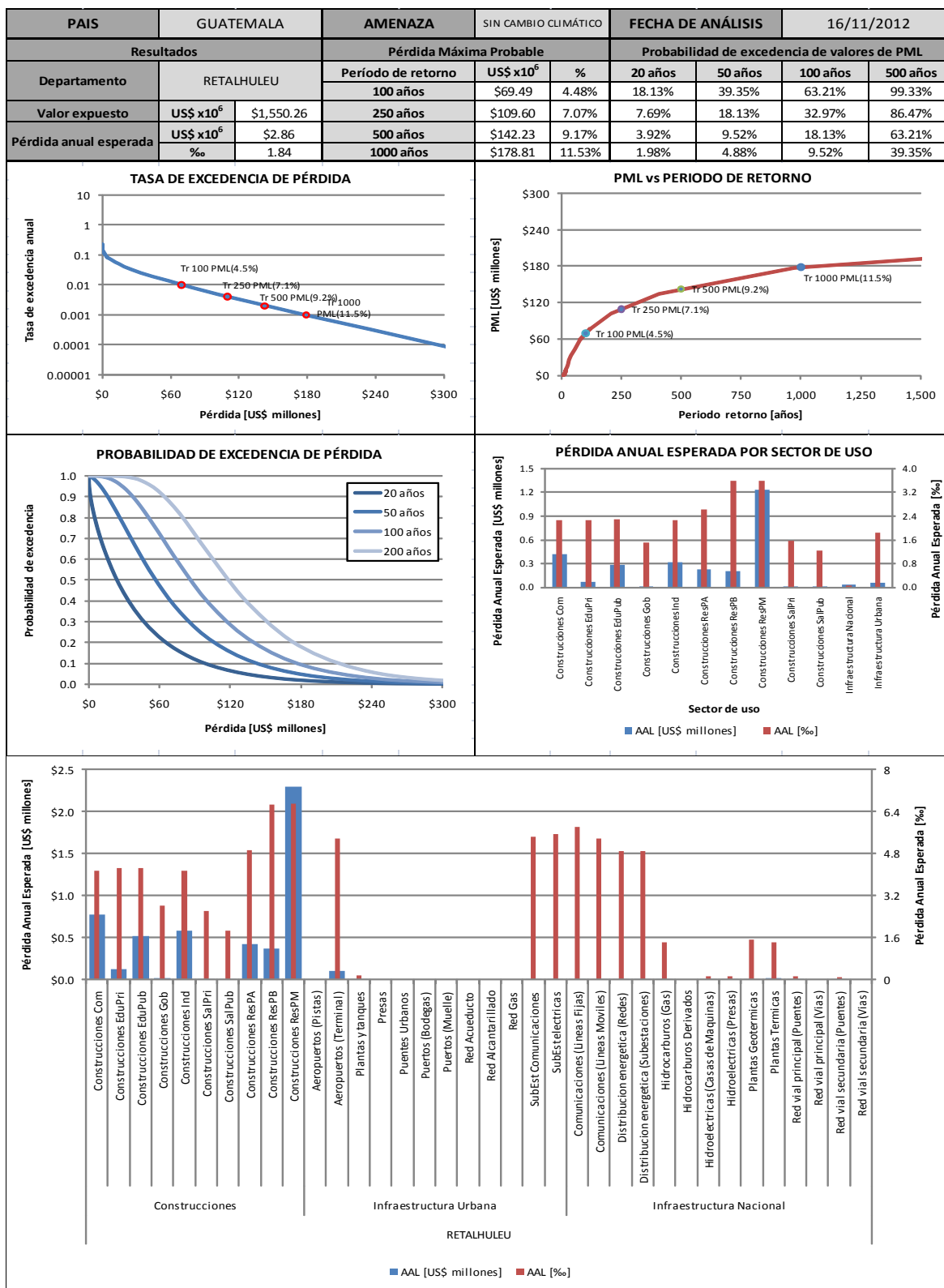


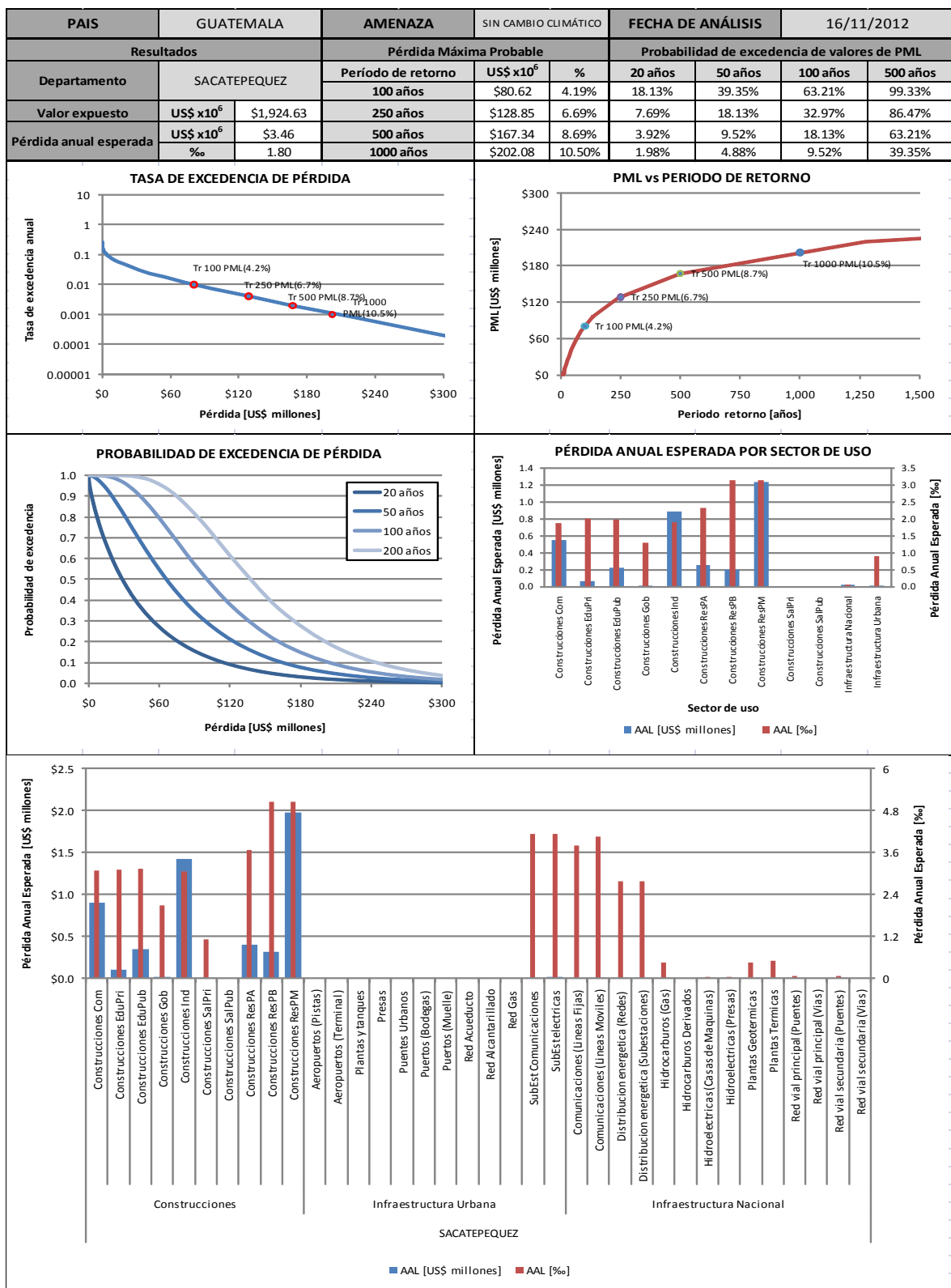


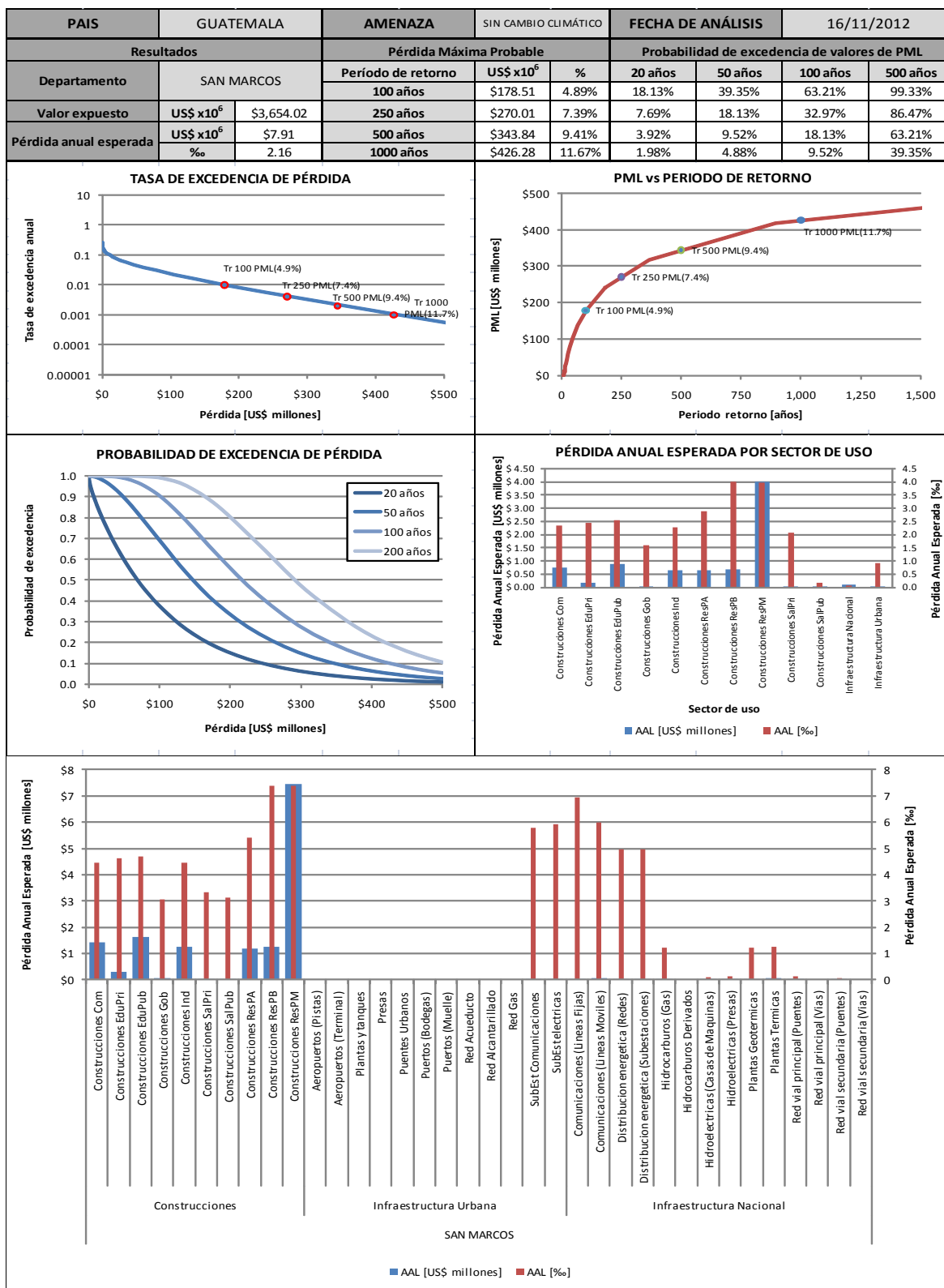


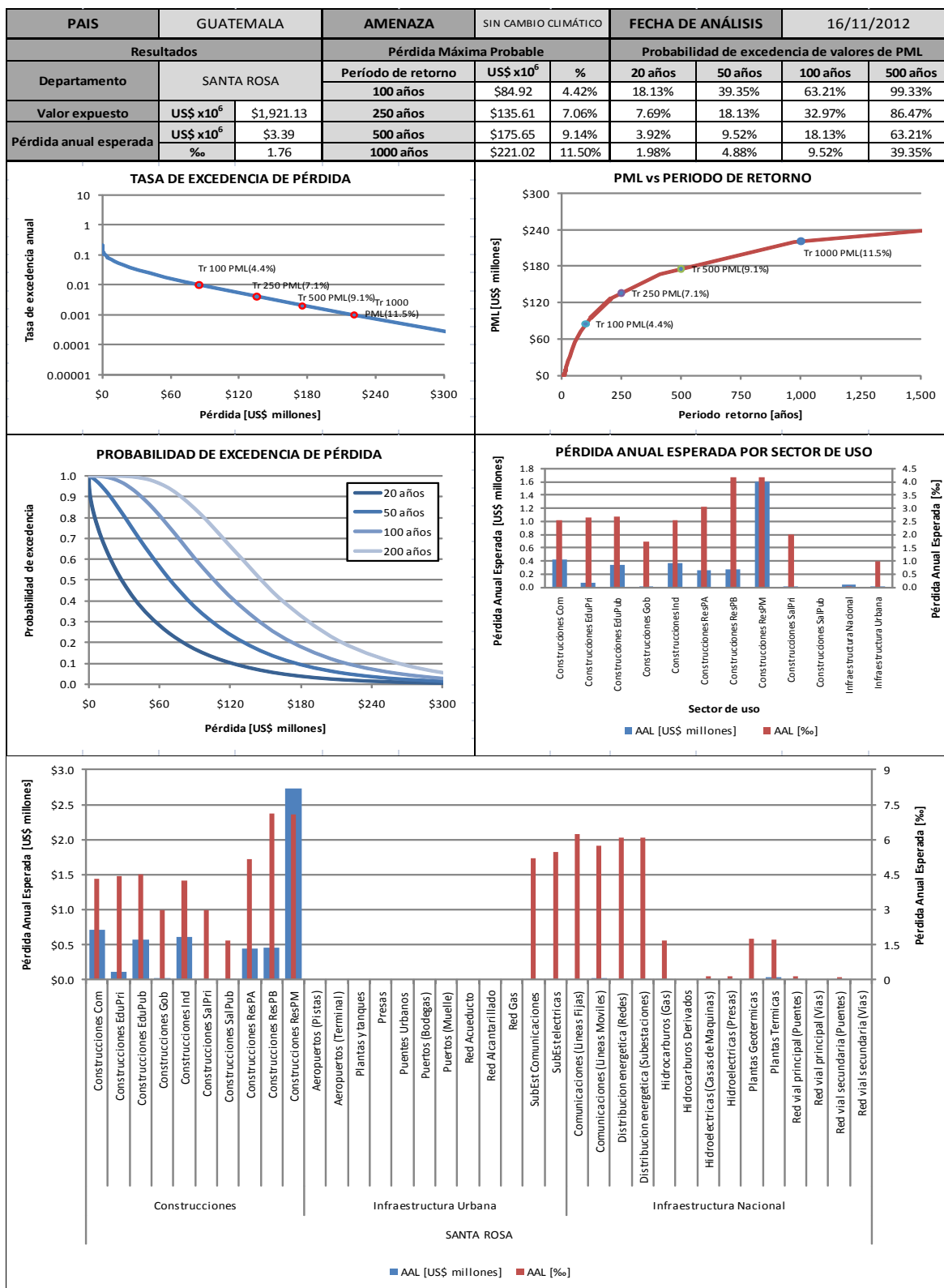


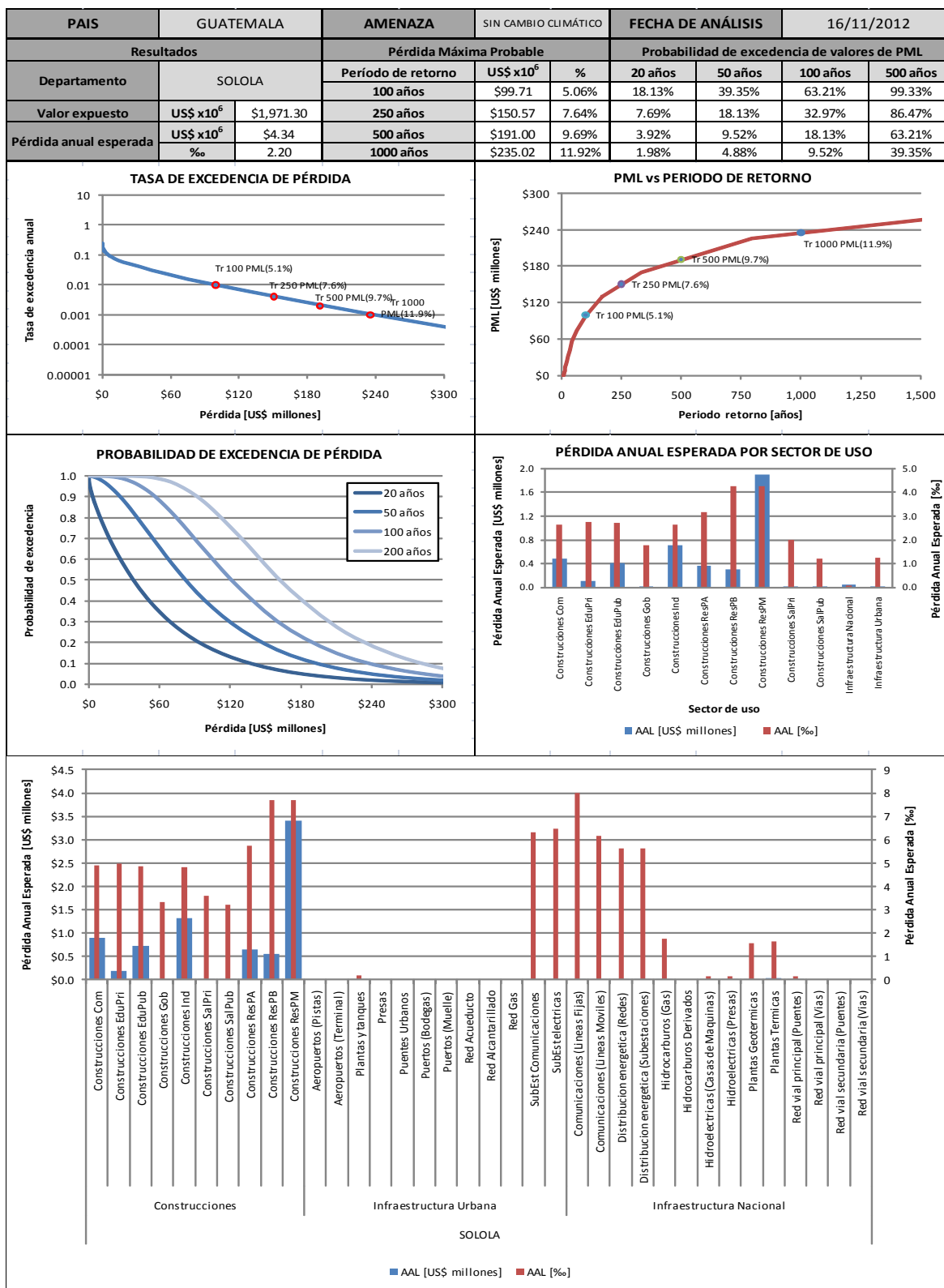


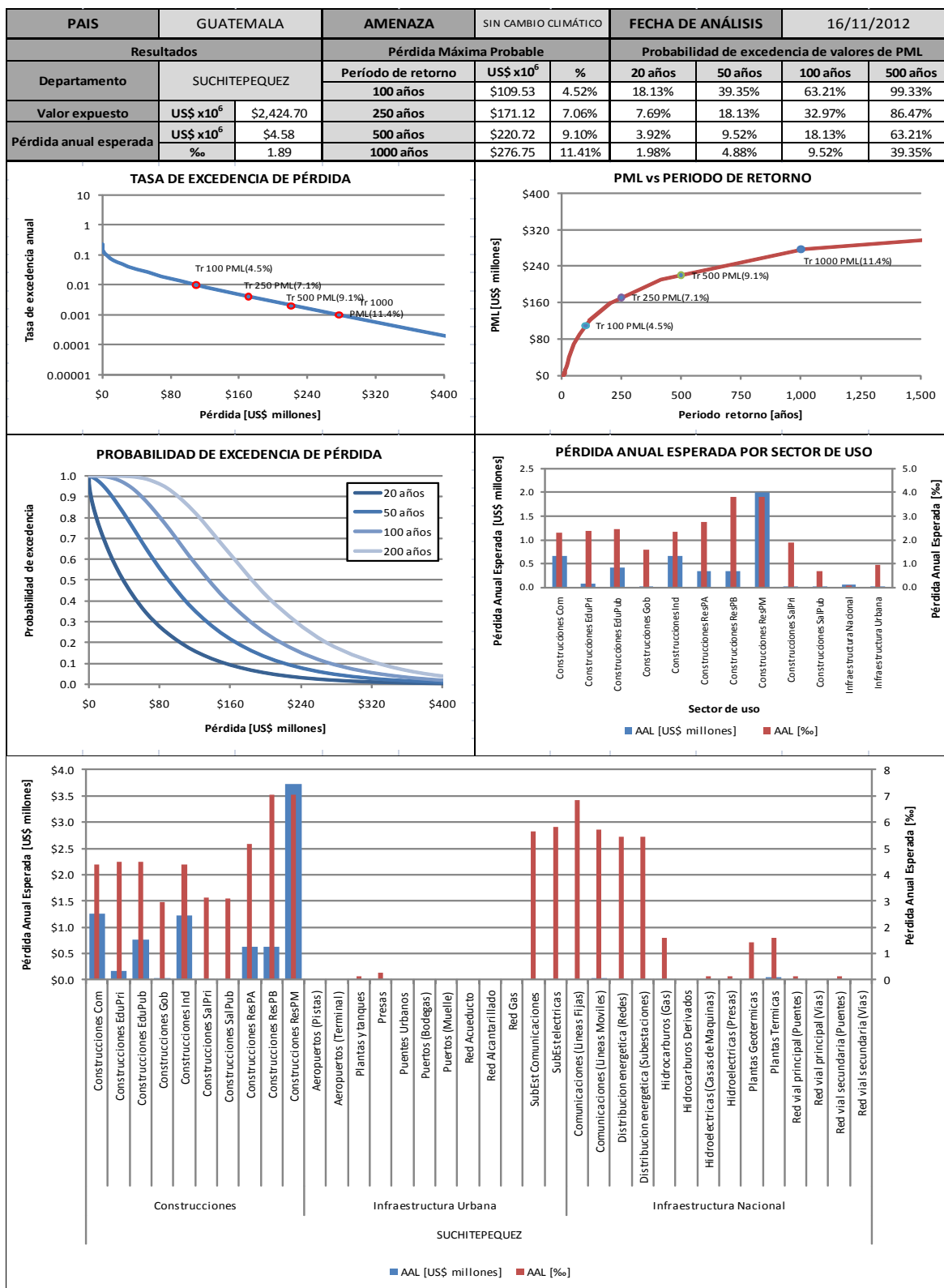


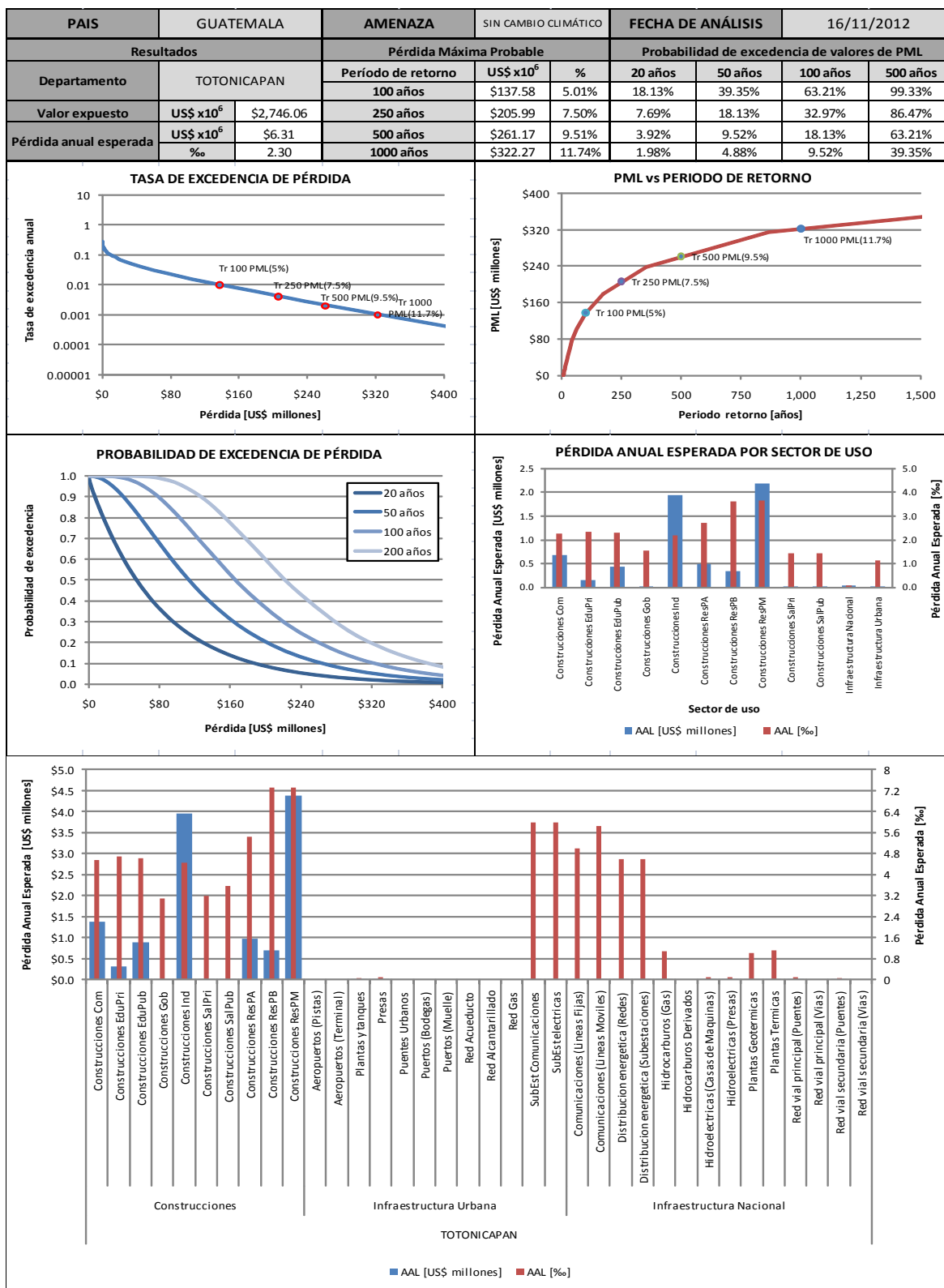




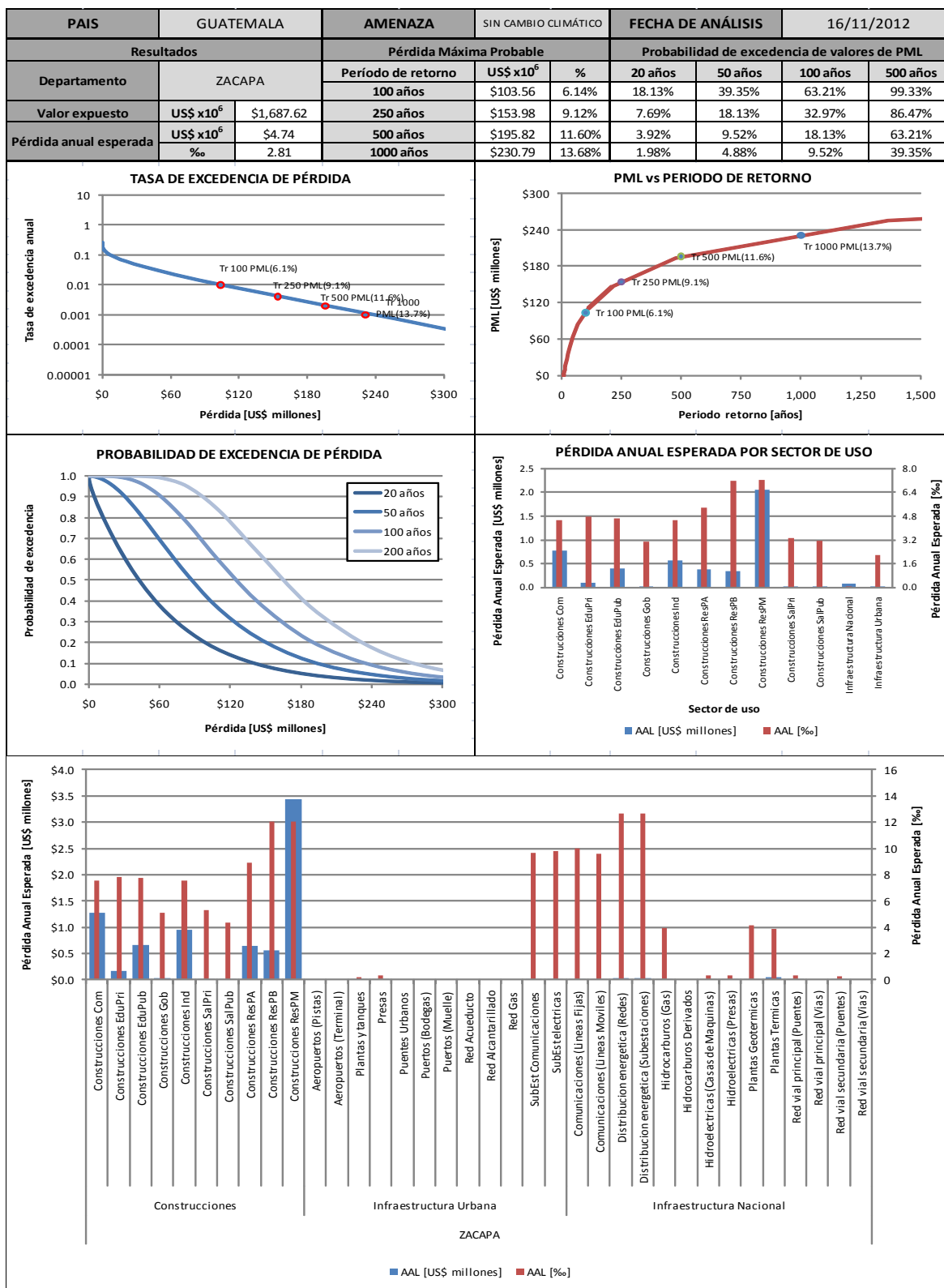






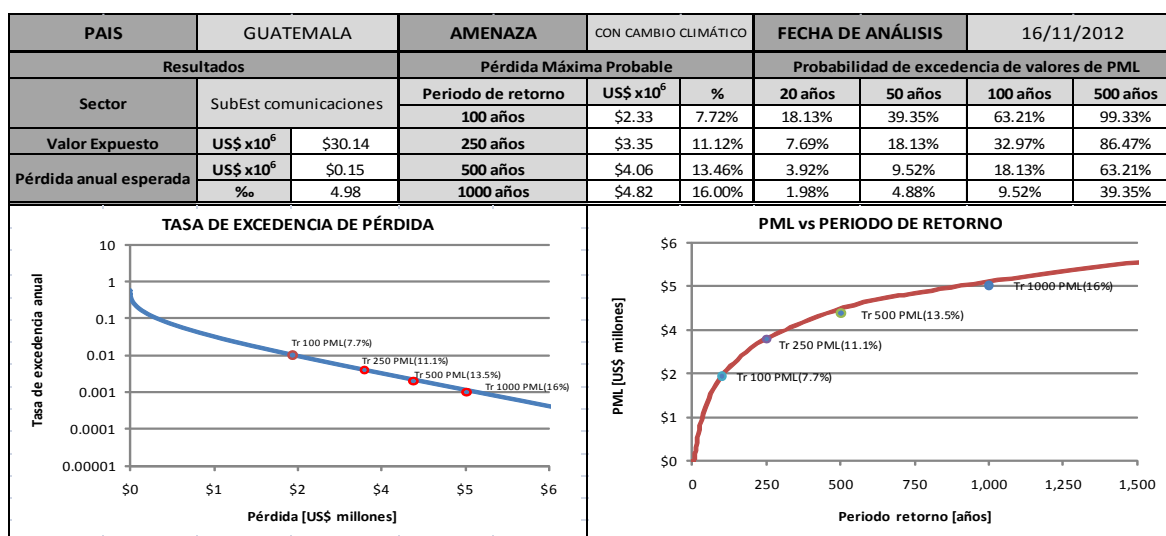
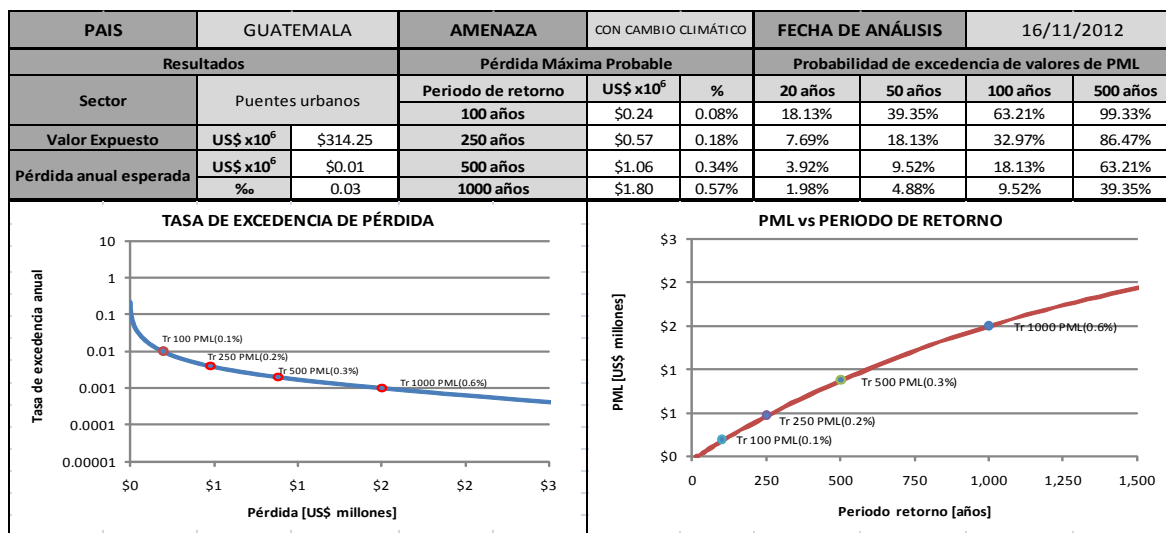


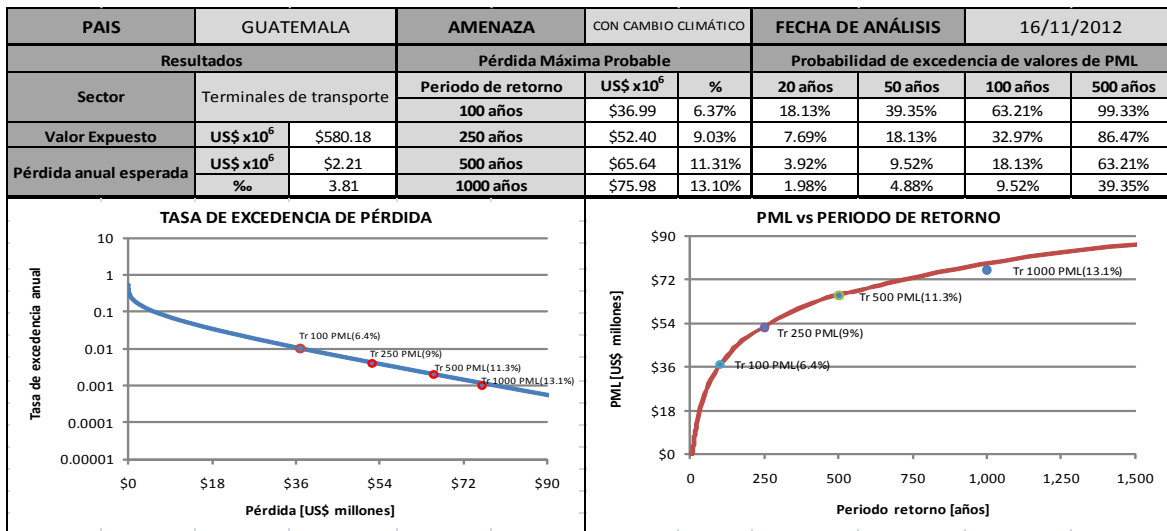
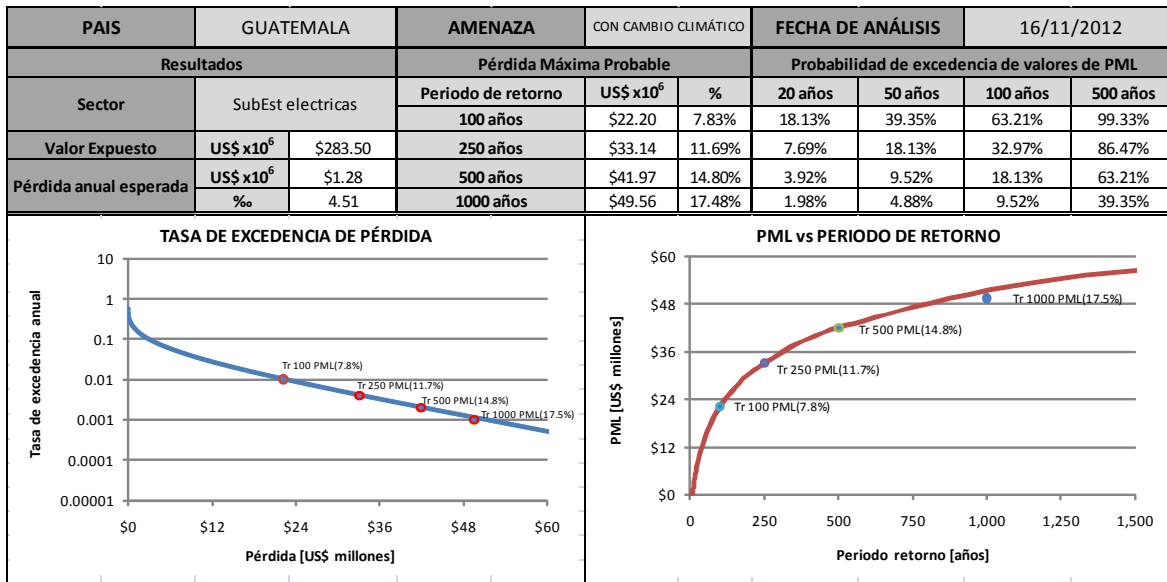




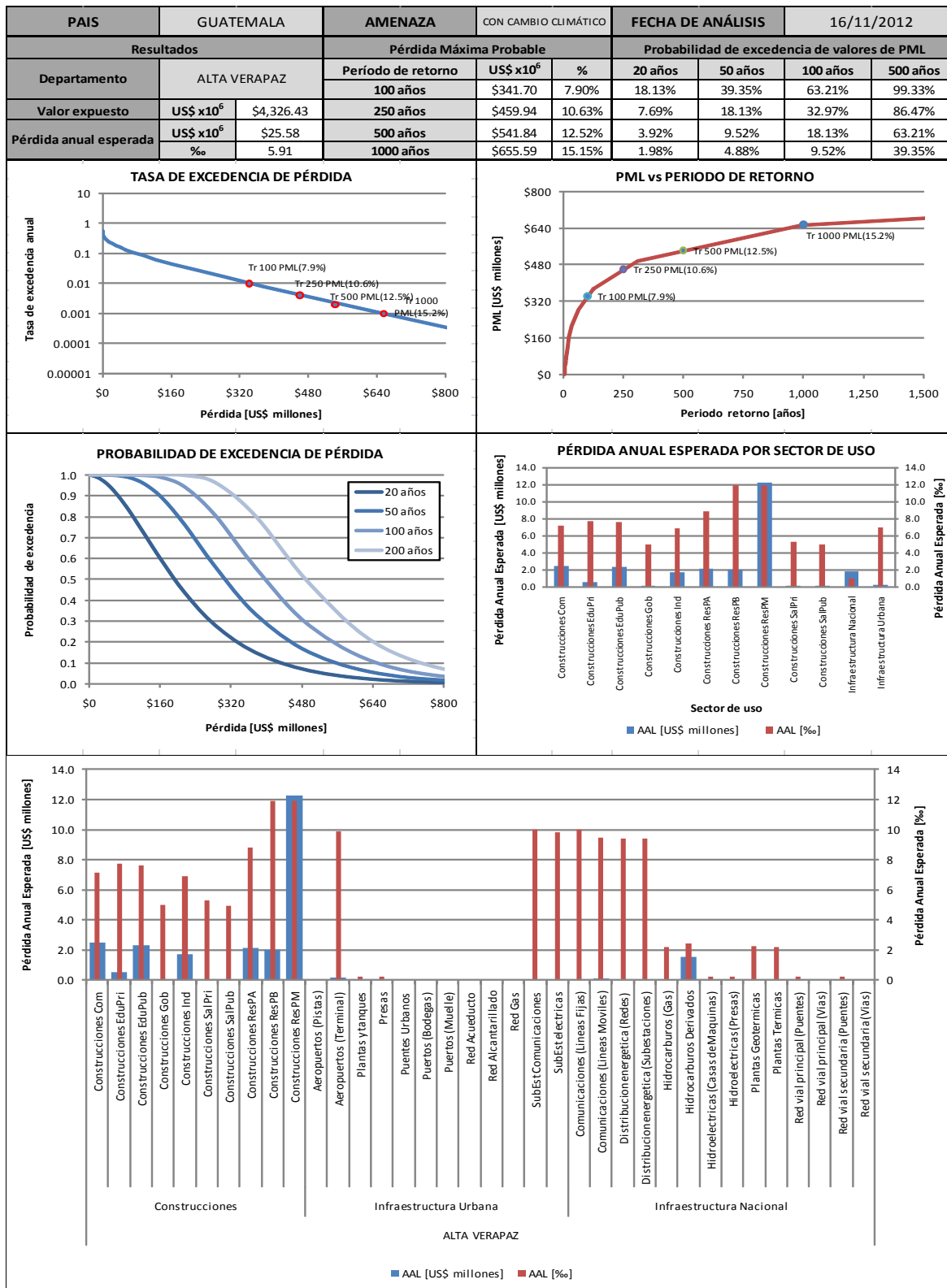
## ANEXO 5. PÉRDIDAS POR DEPARTAMENTO Y POR SECTOR PARA GUATEMALA CON EL IMPACTO ASOCIADO AL CAMBIO CLIMÁTICO

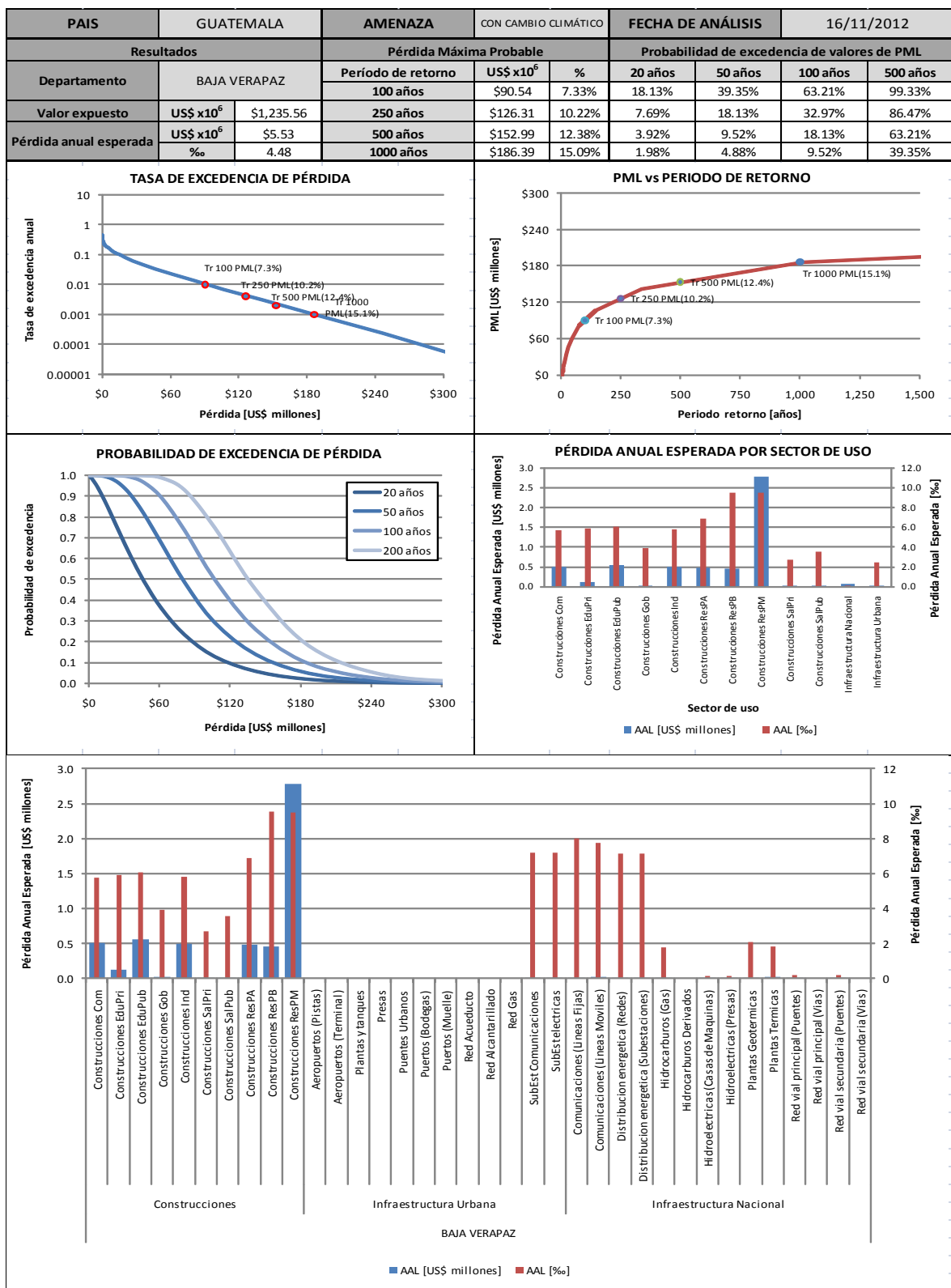
### Pérdidas por sector

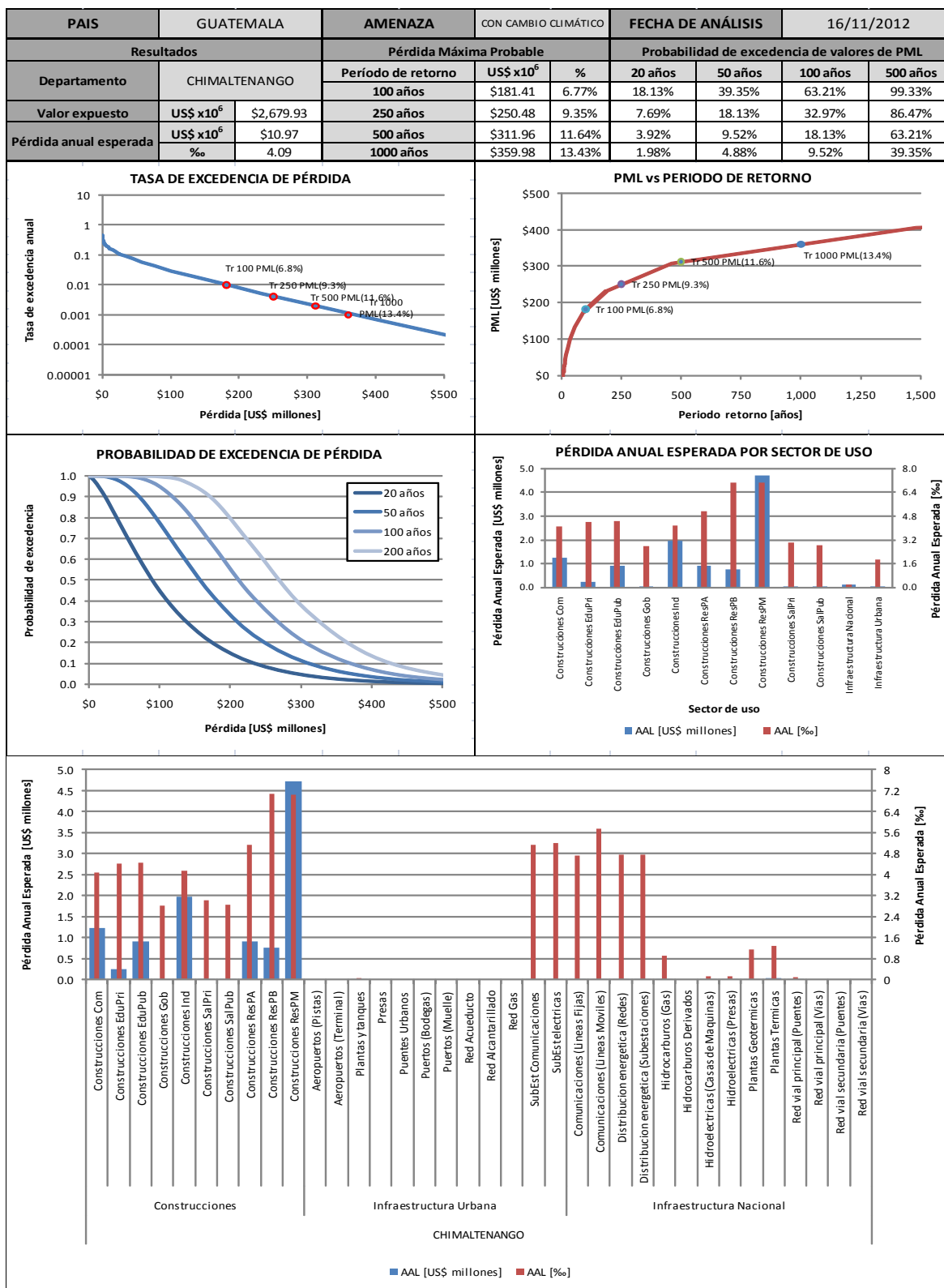


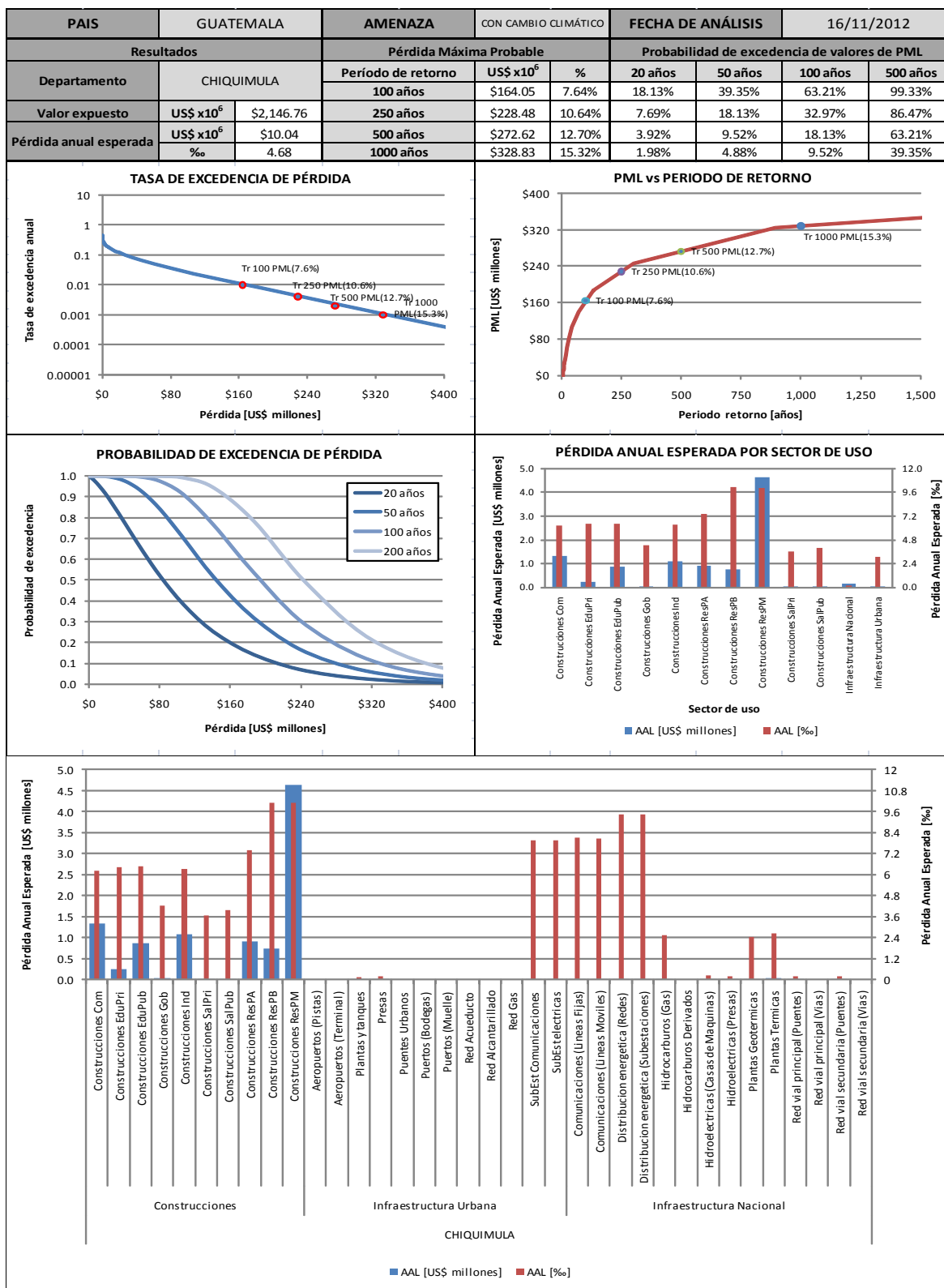


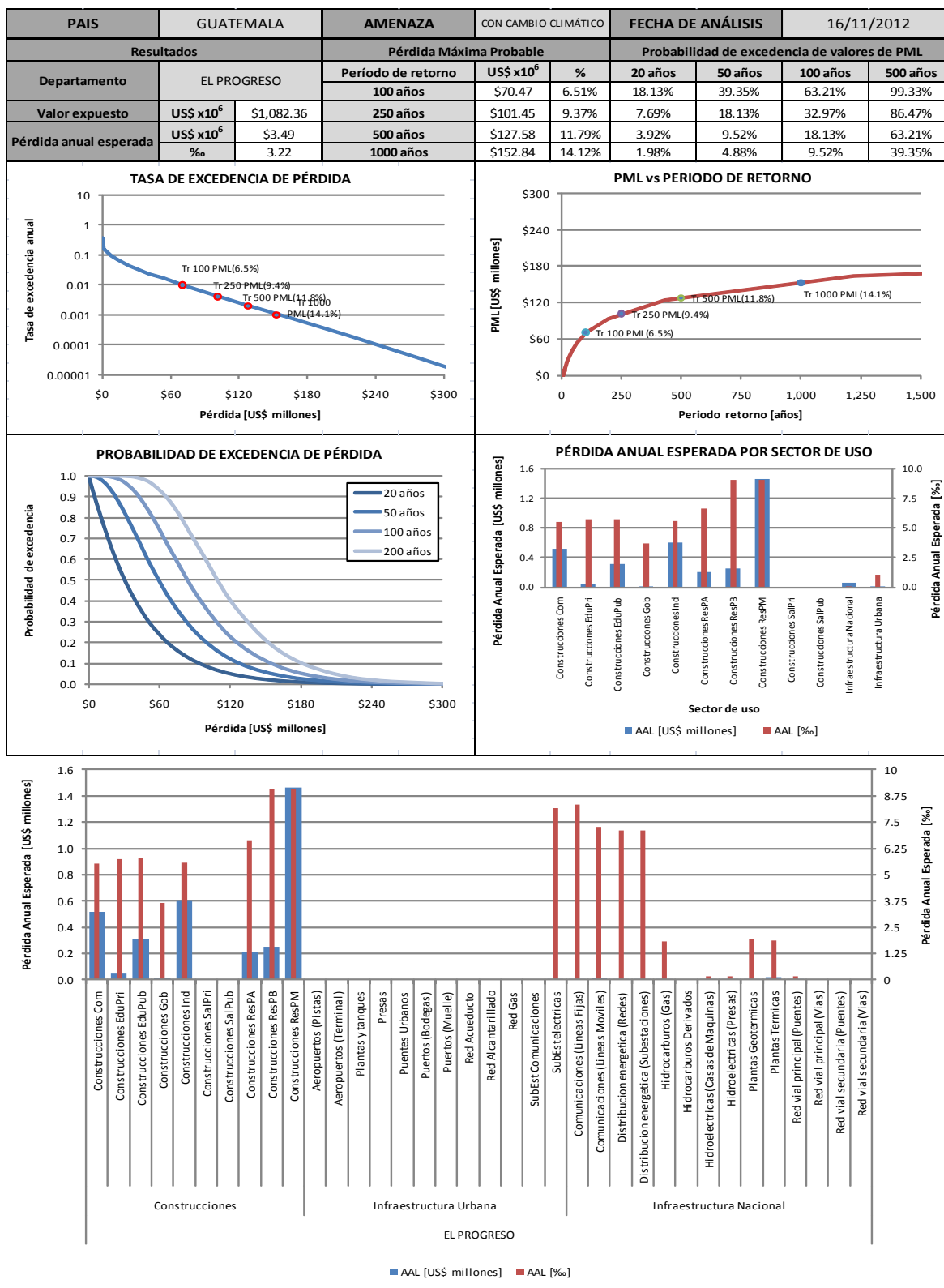
## Pérdidas por departamento



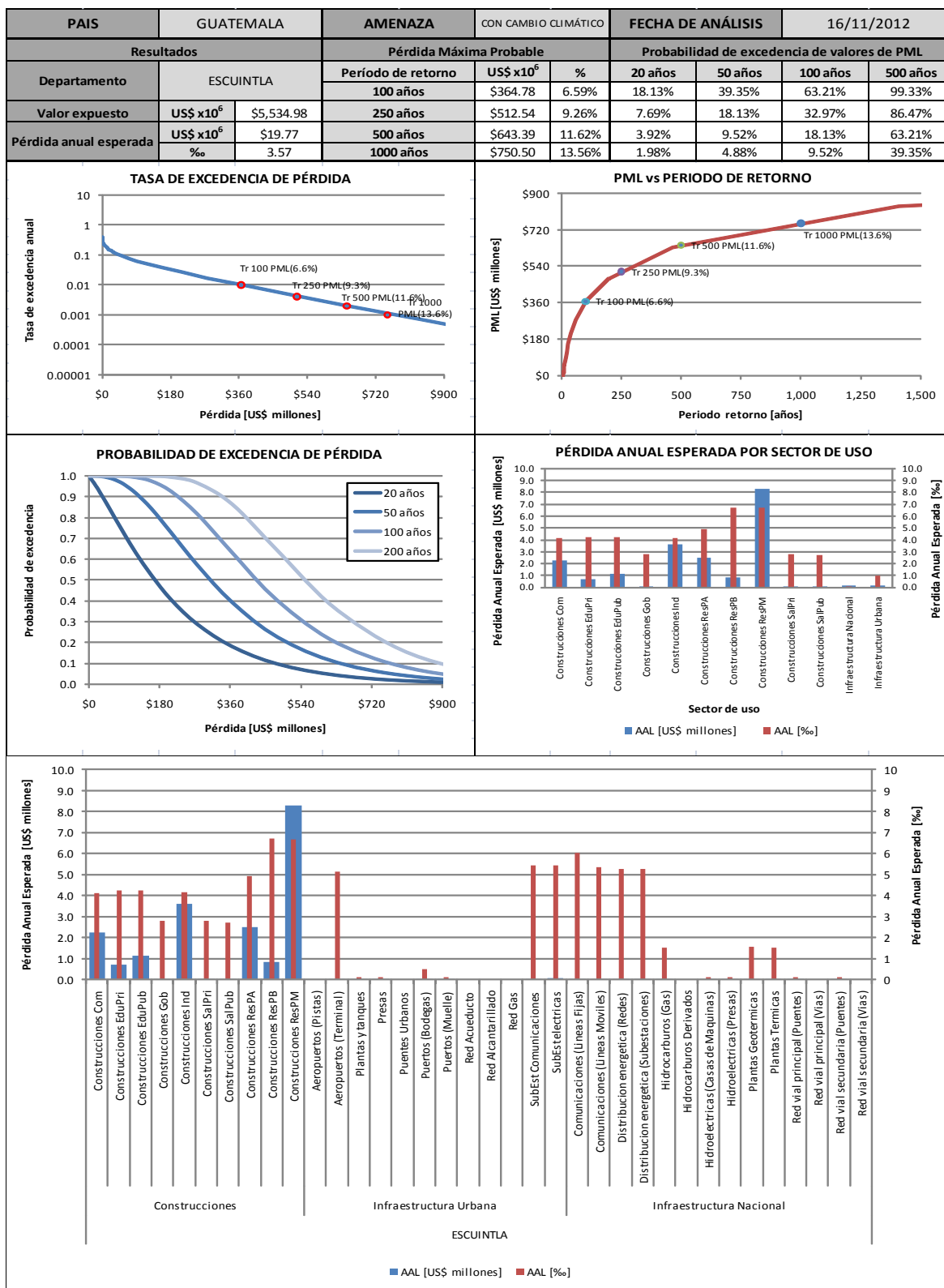


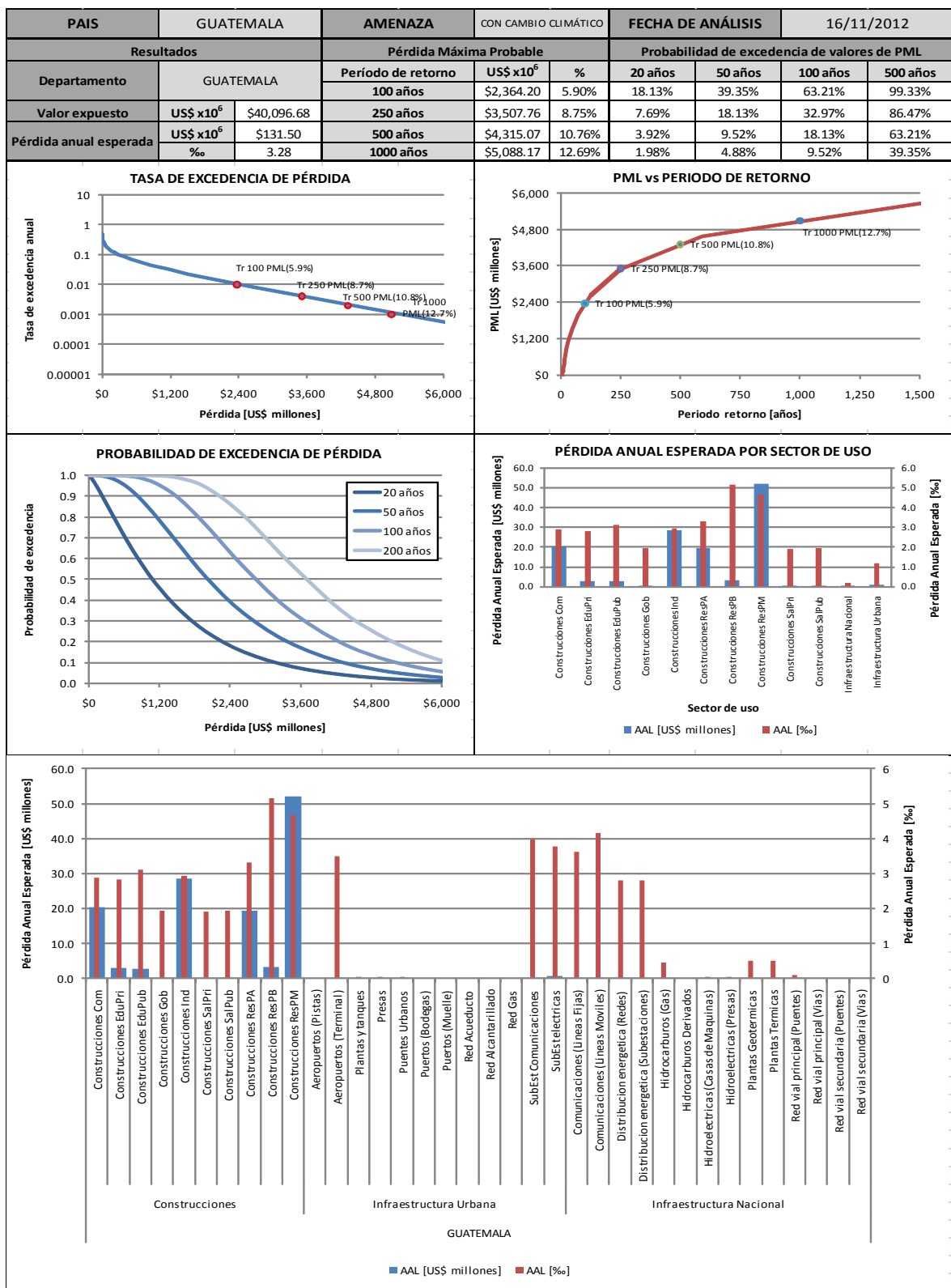


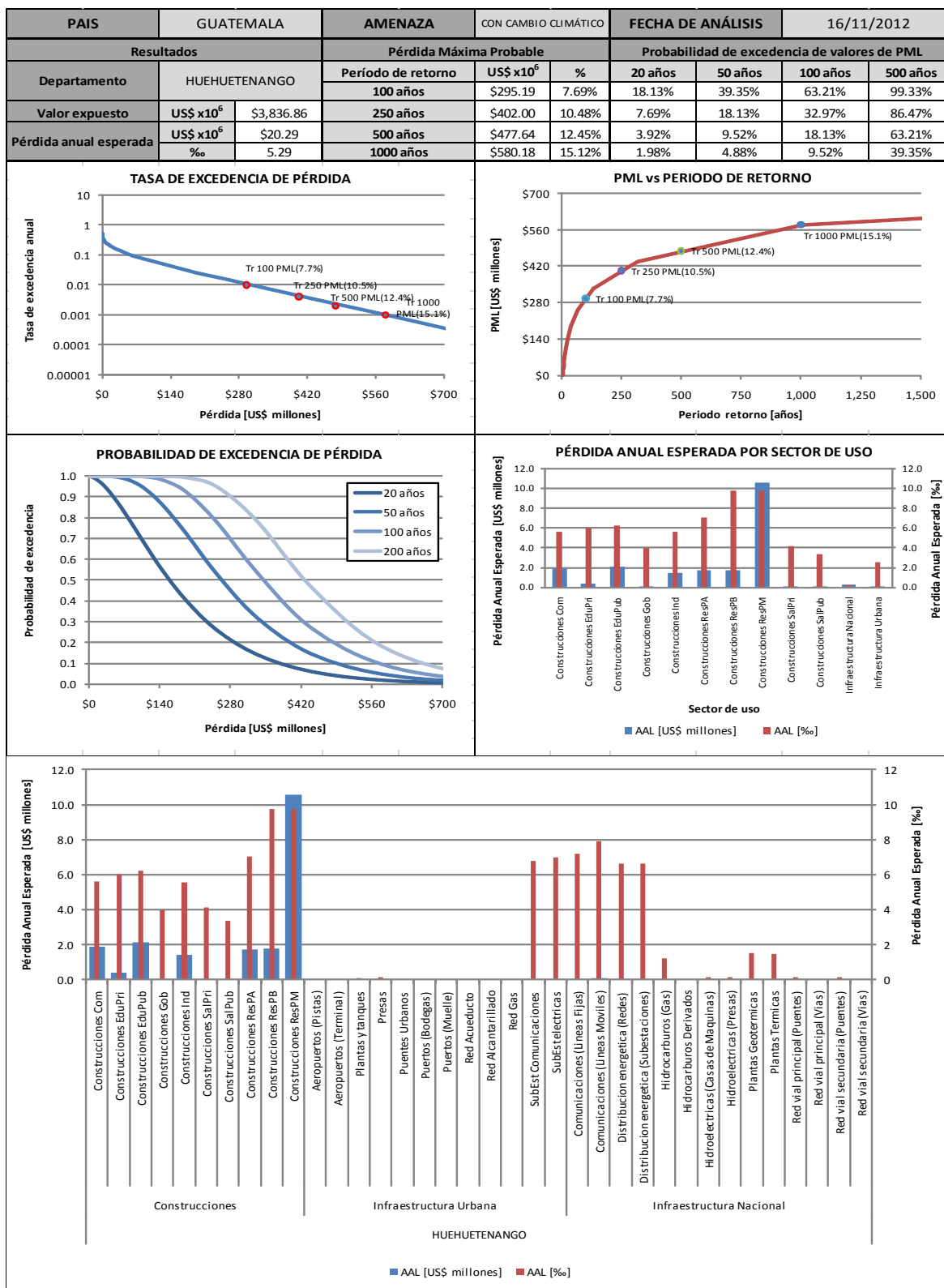


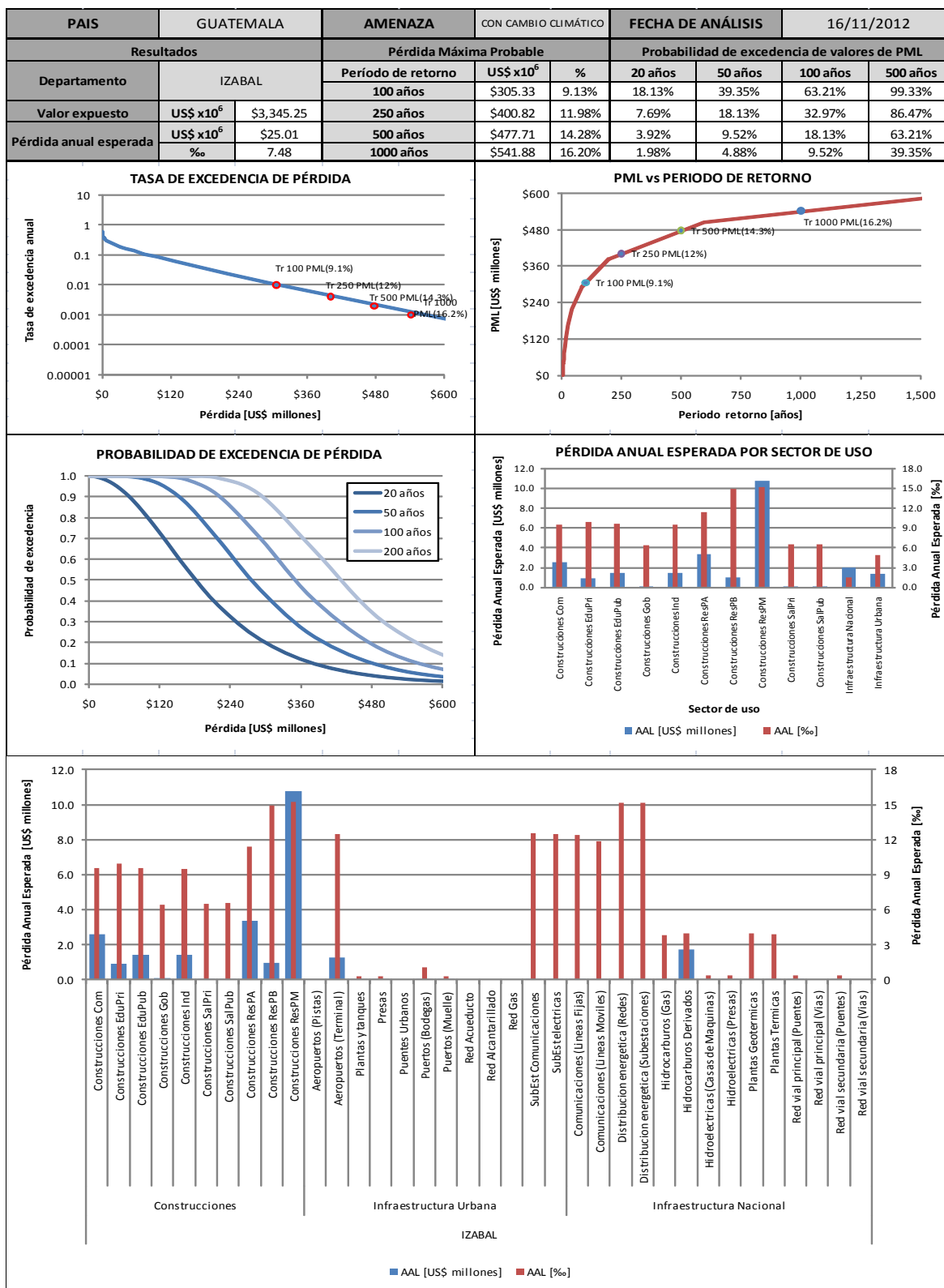


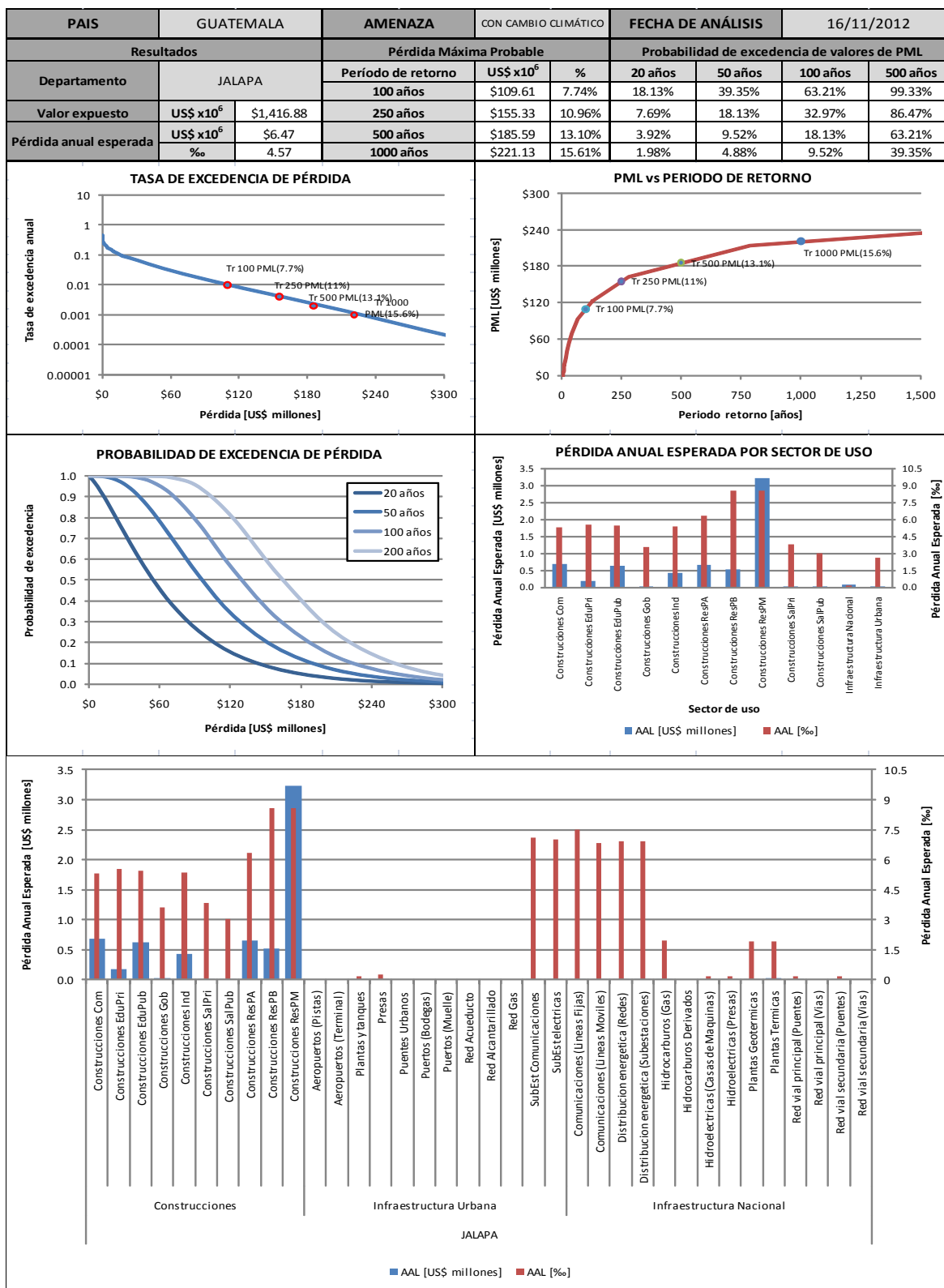


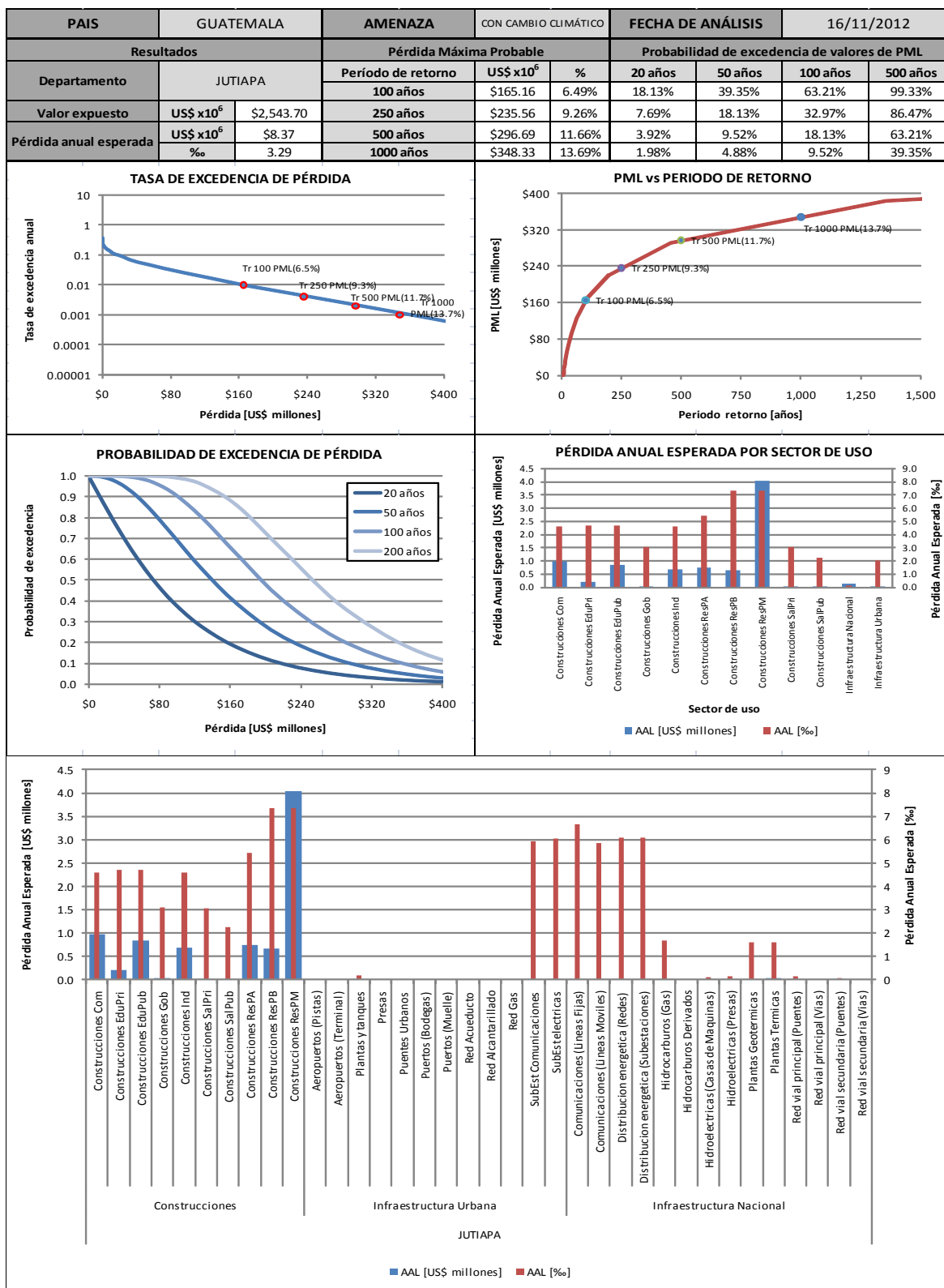


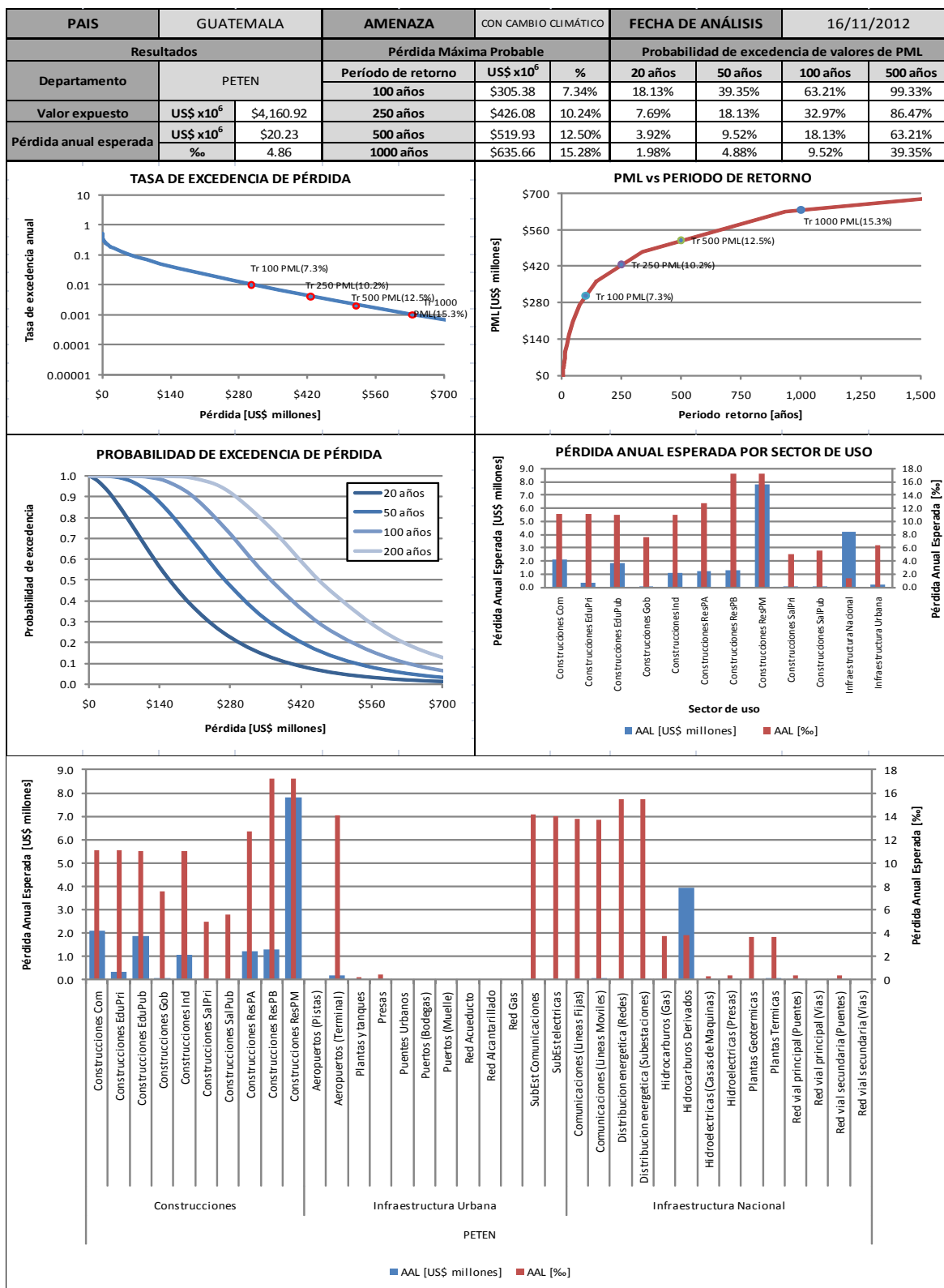


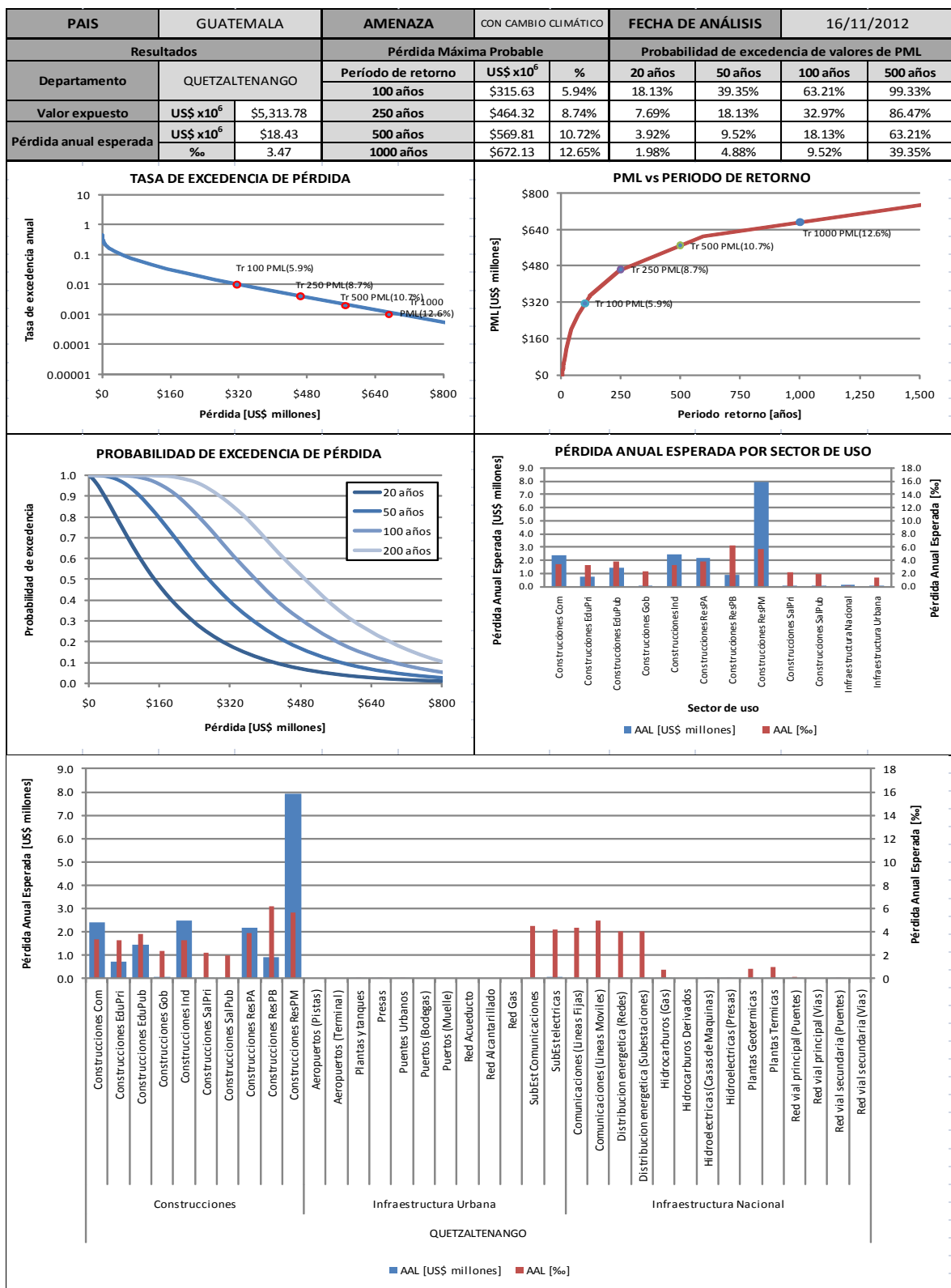




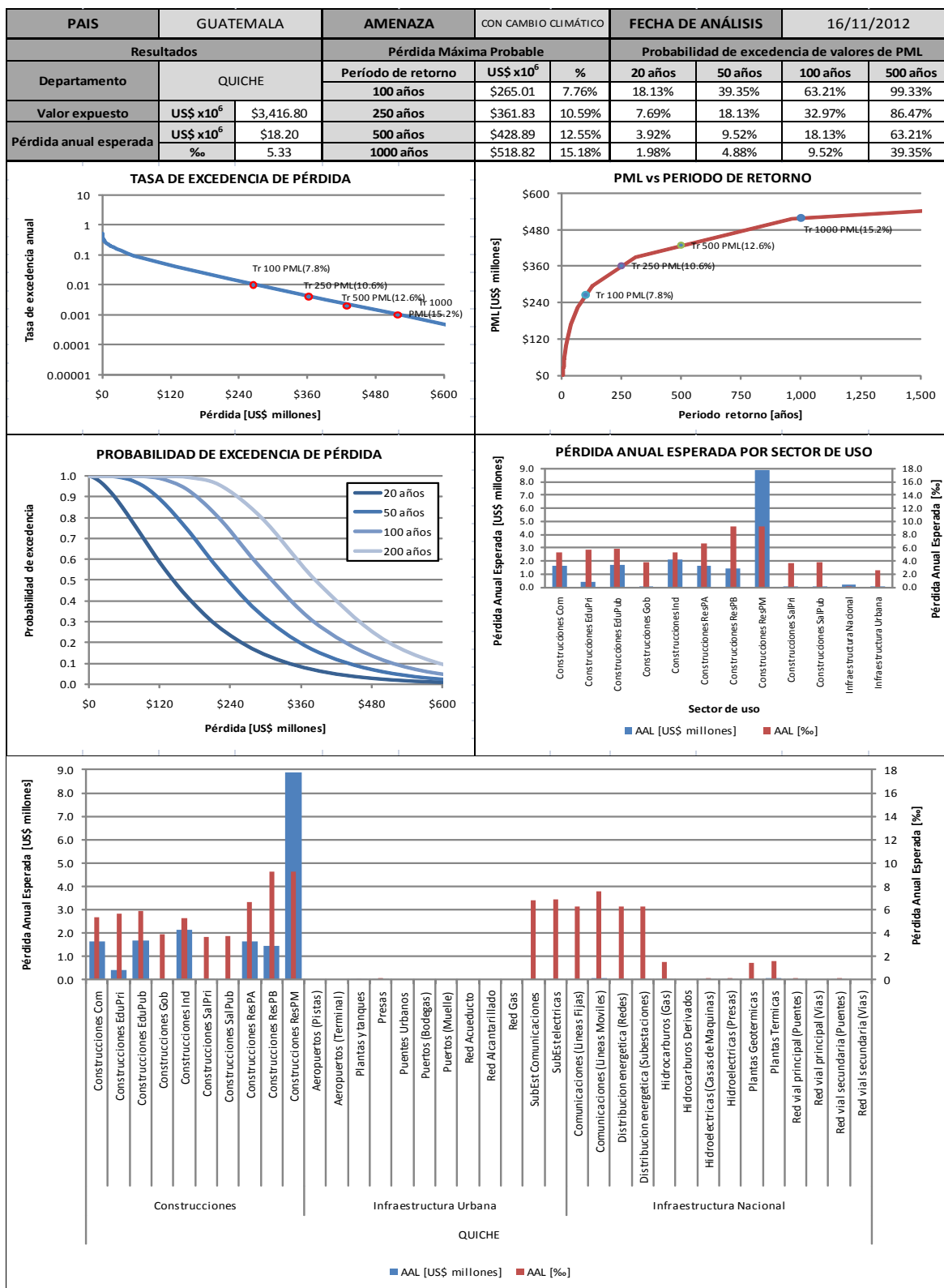


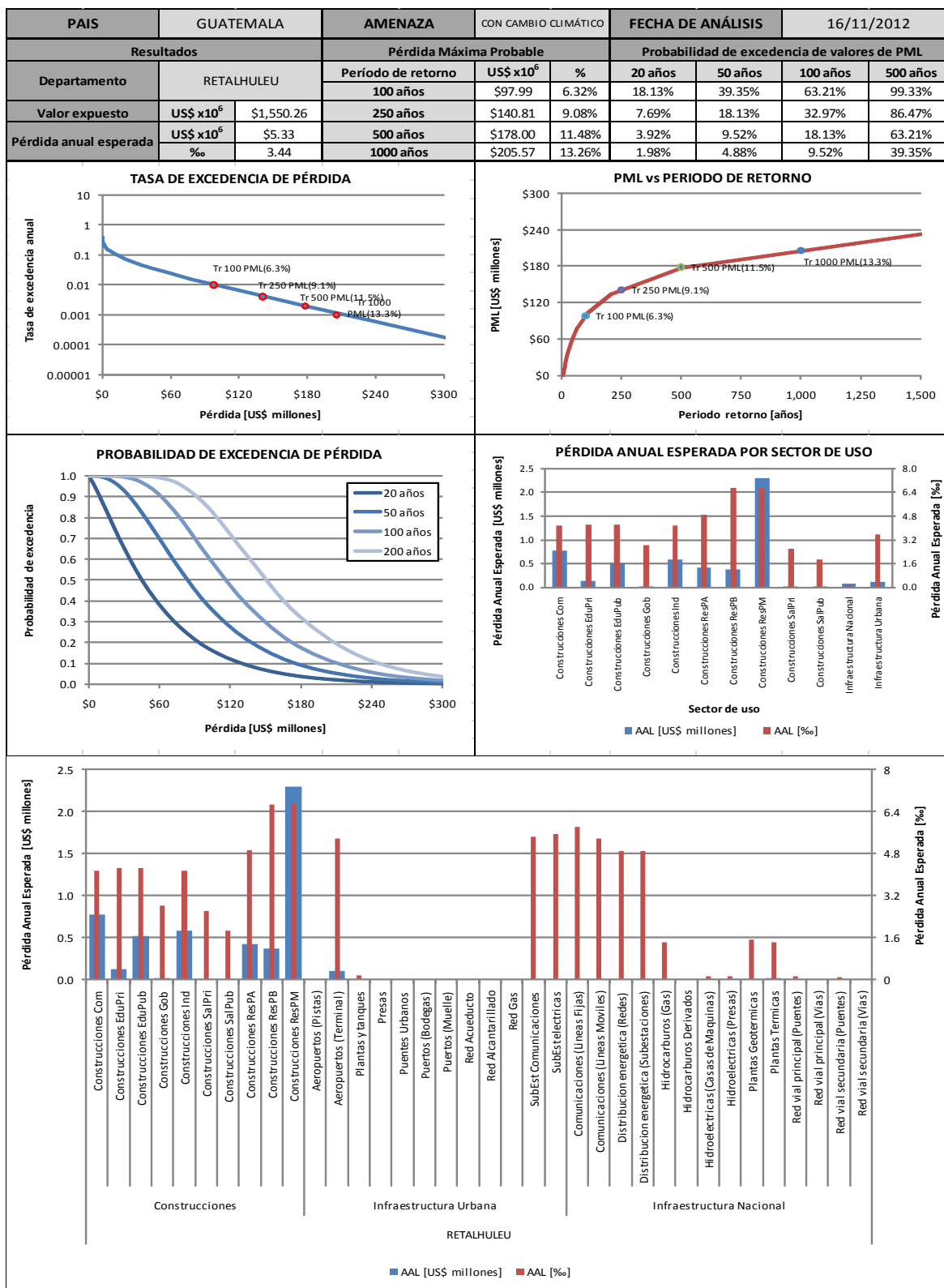


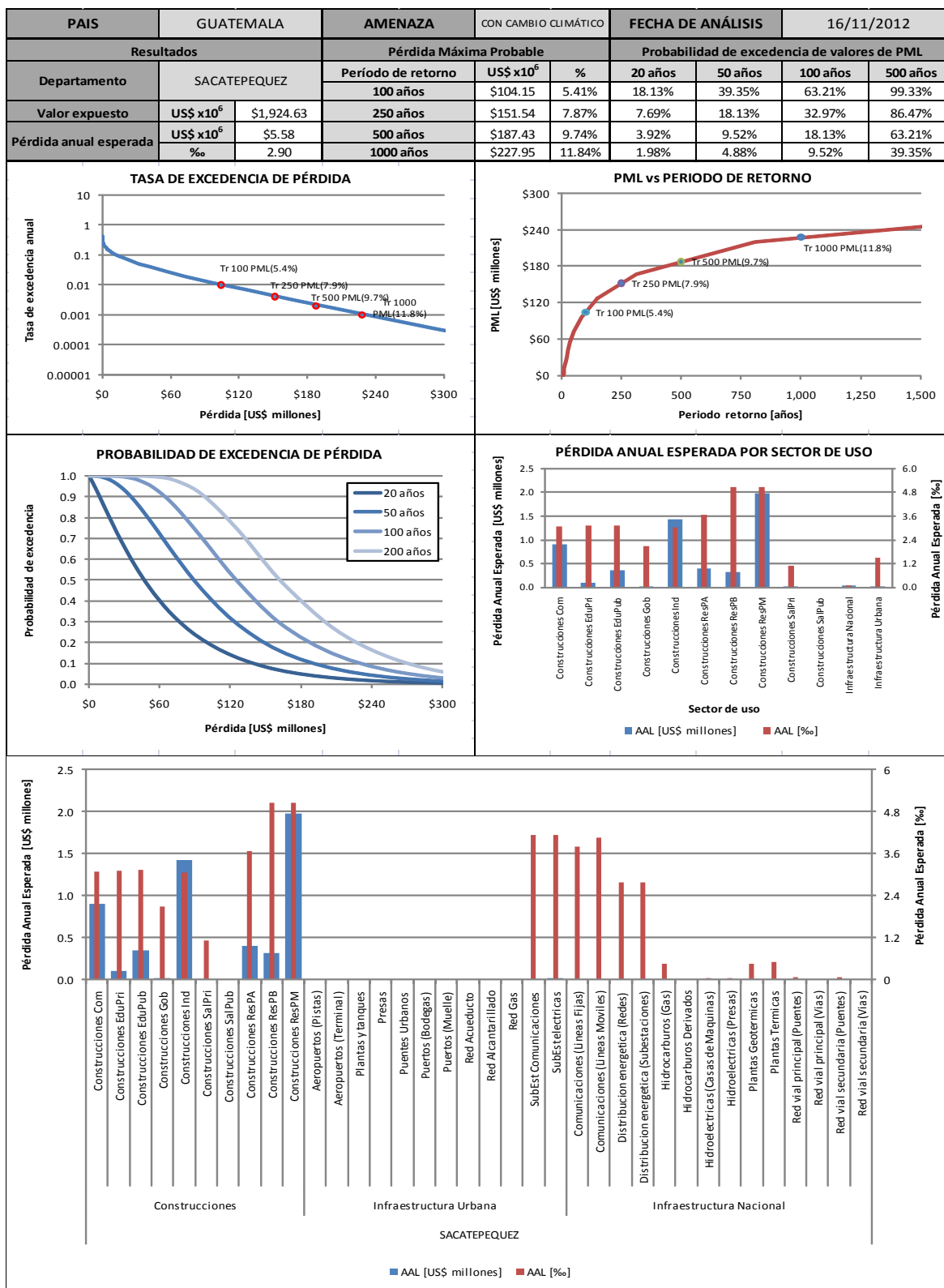


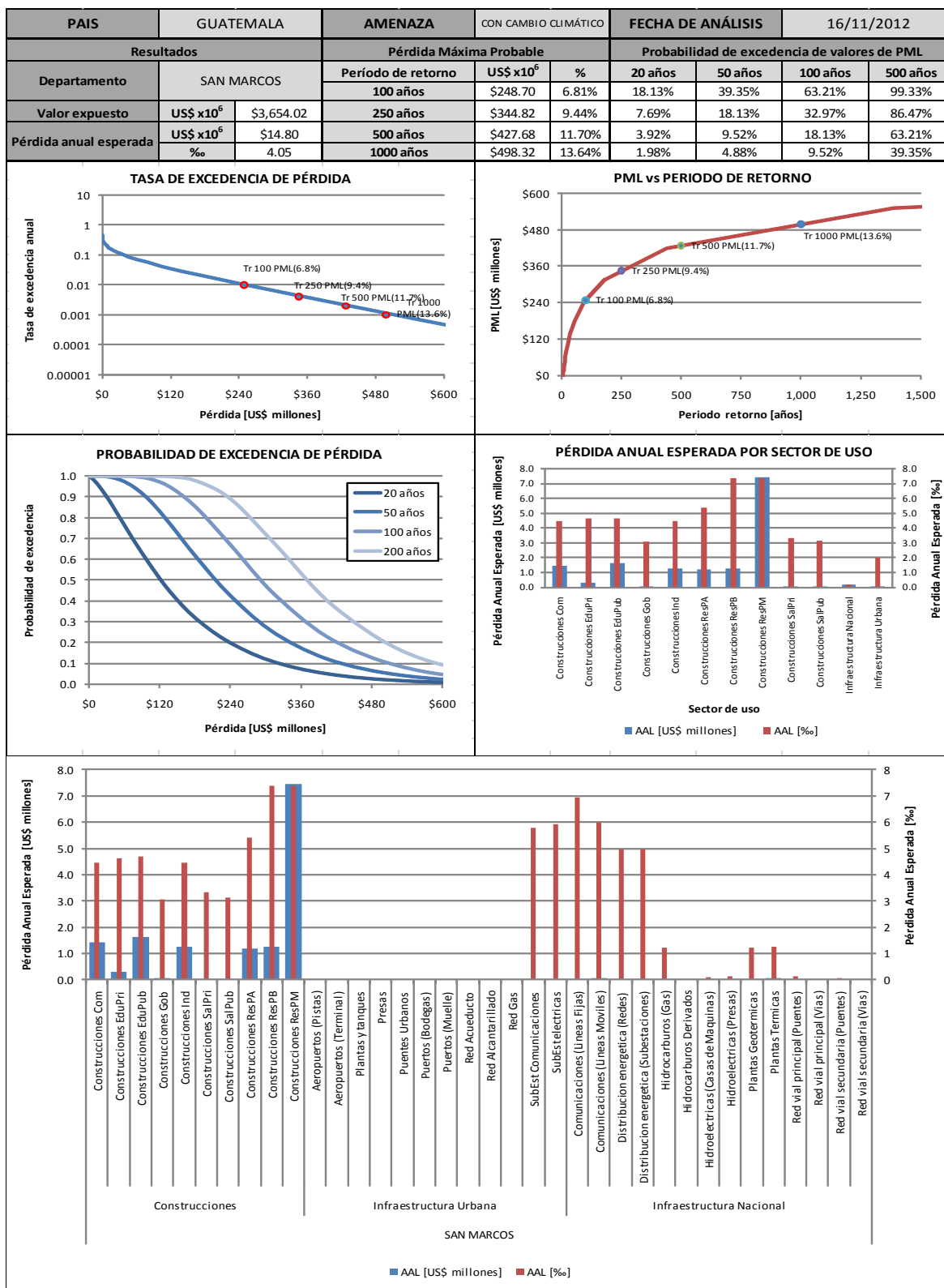


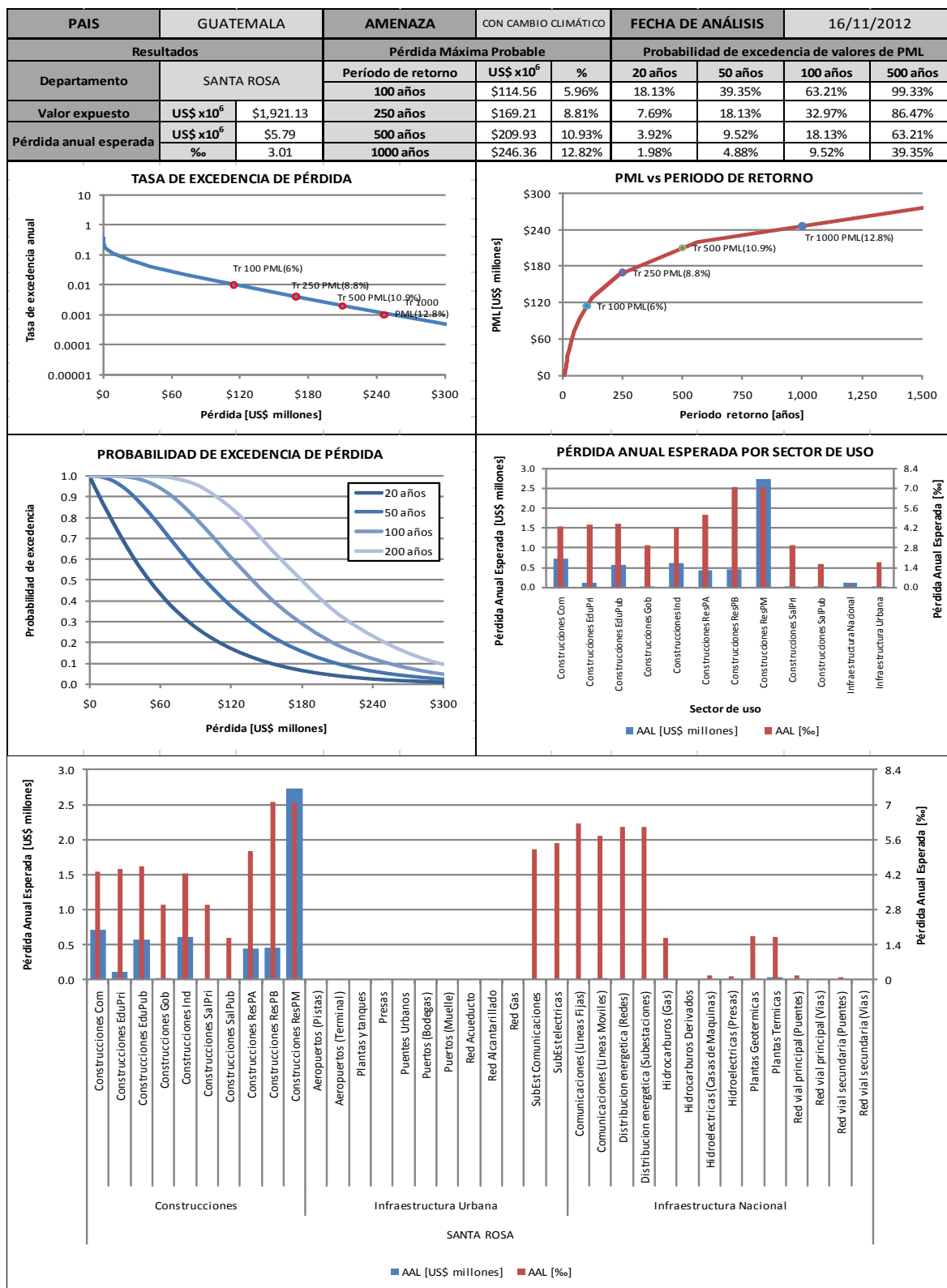


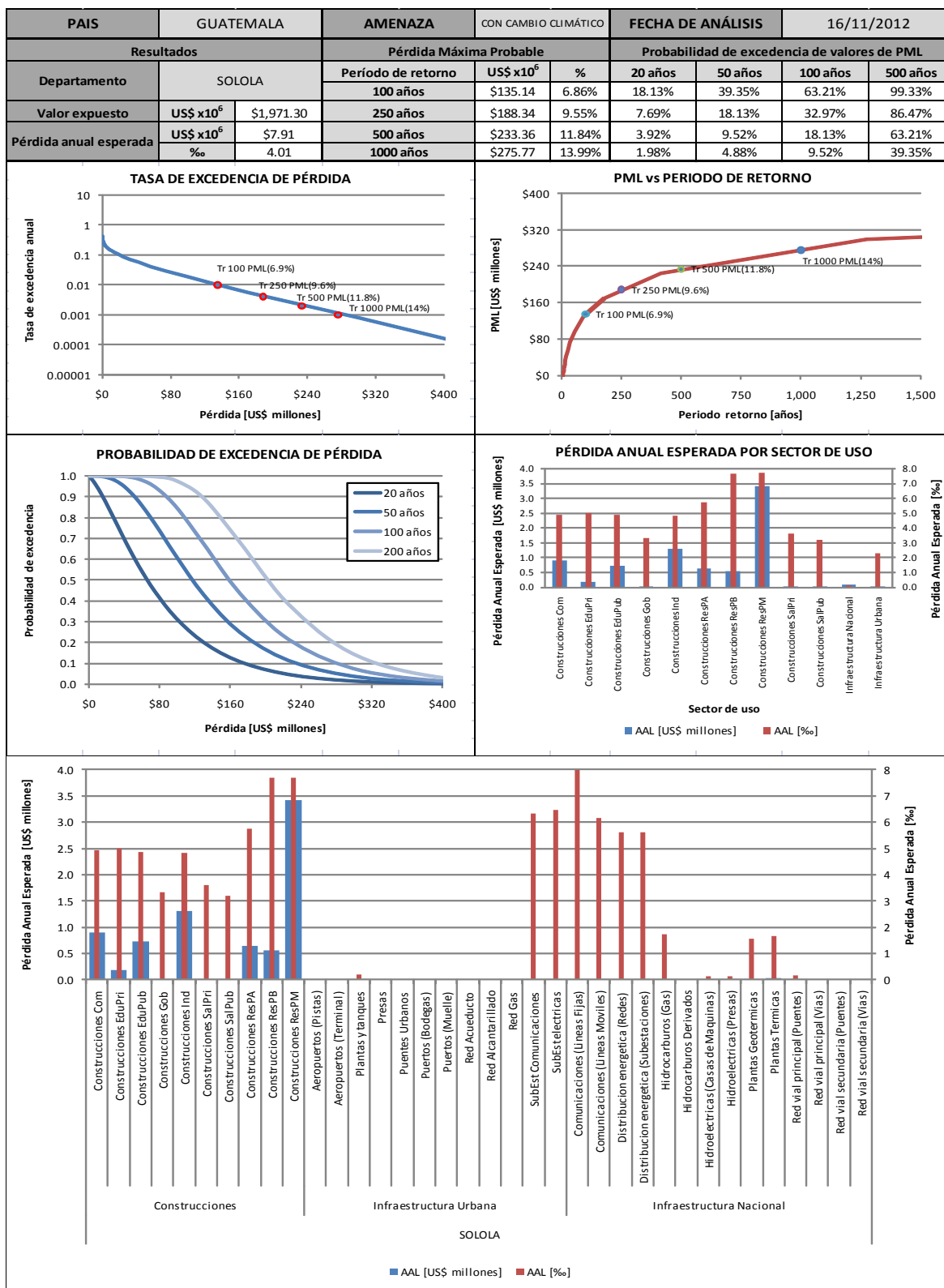


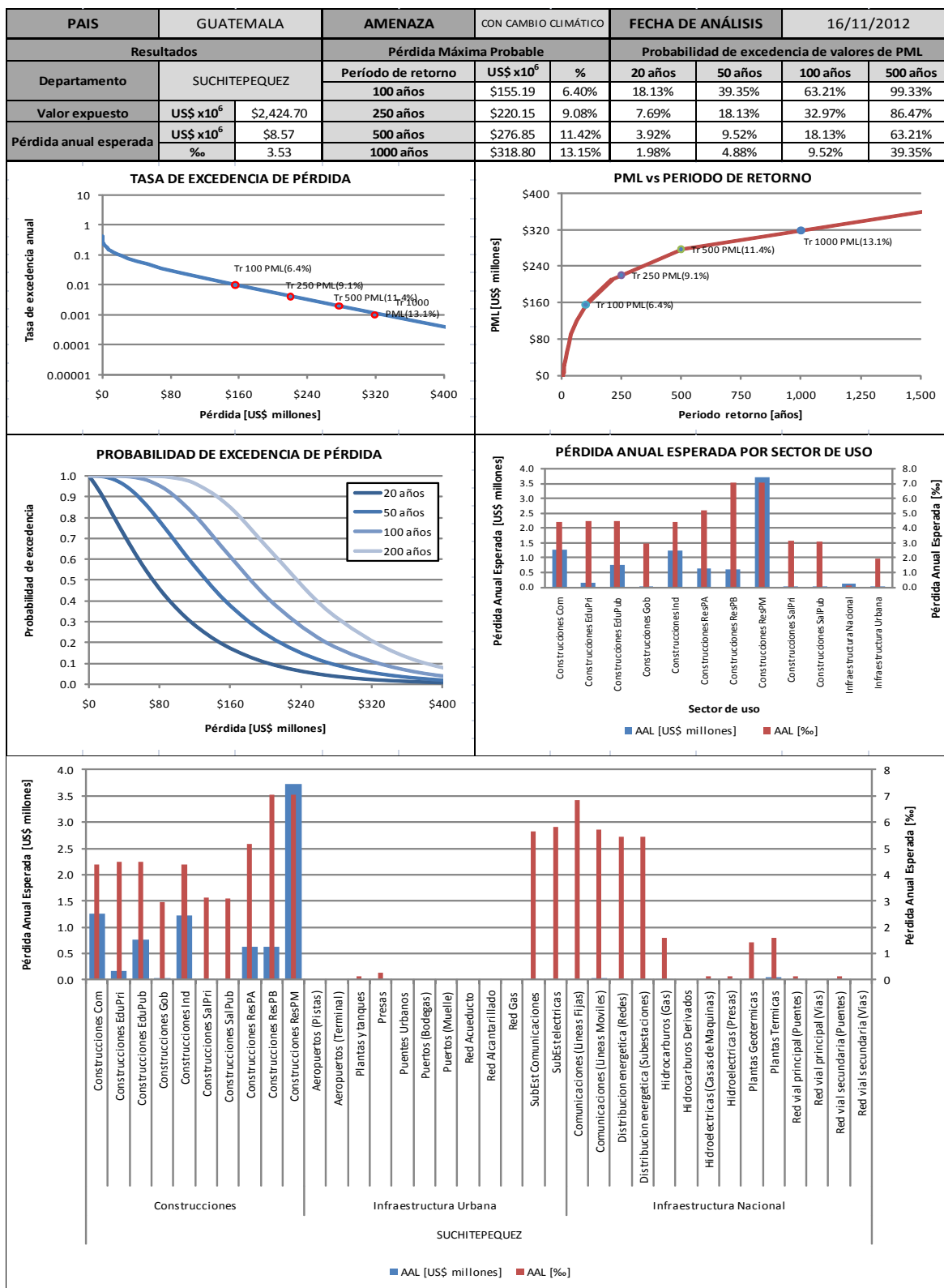


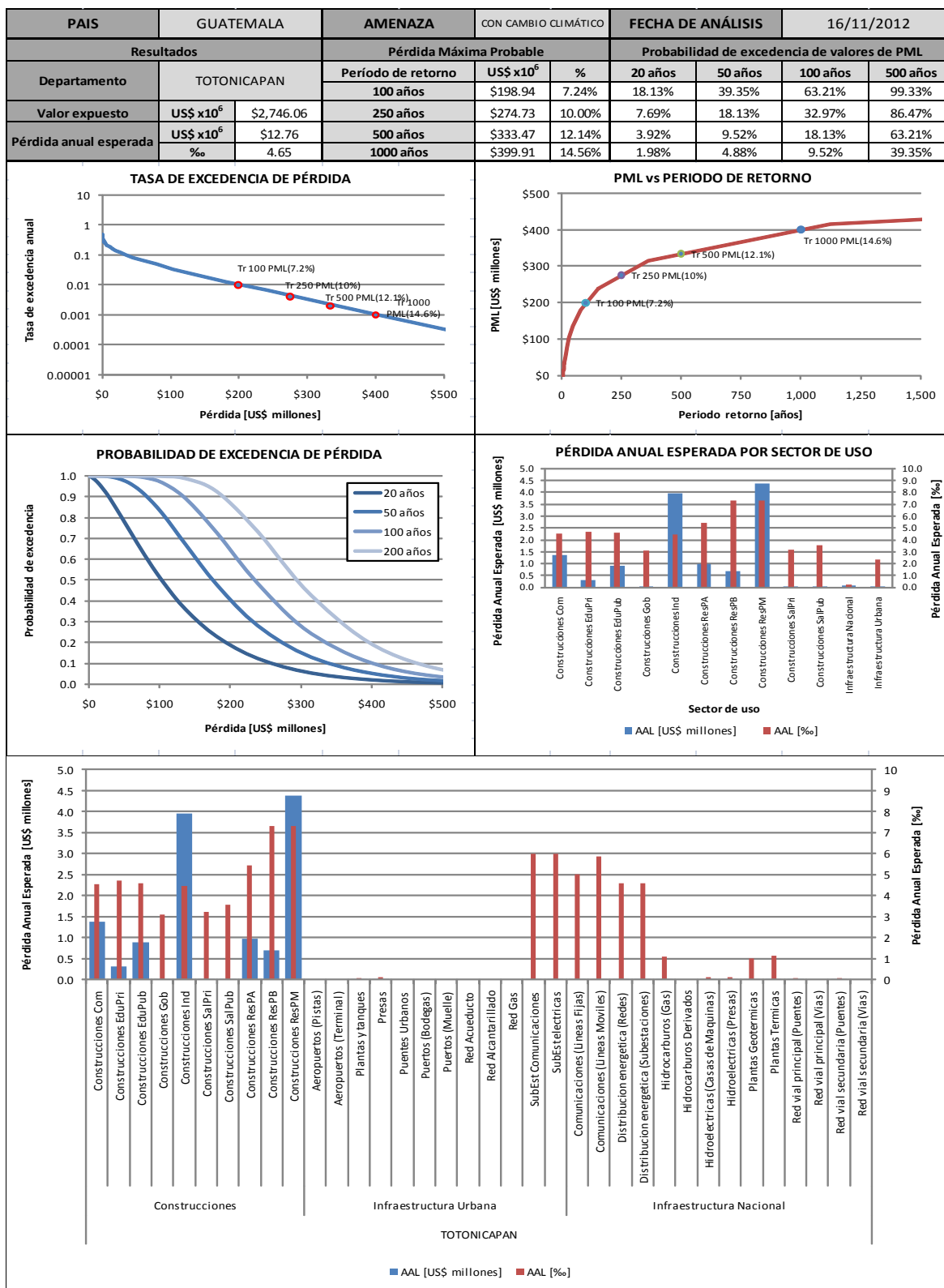




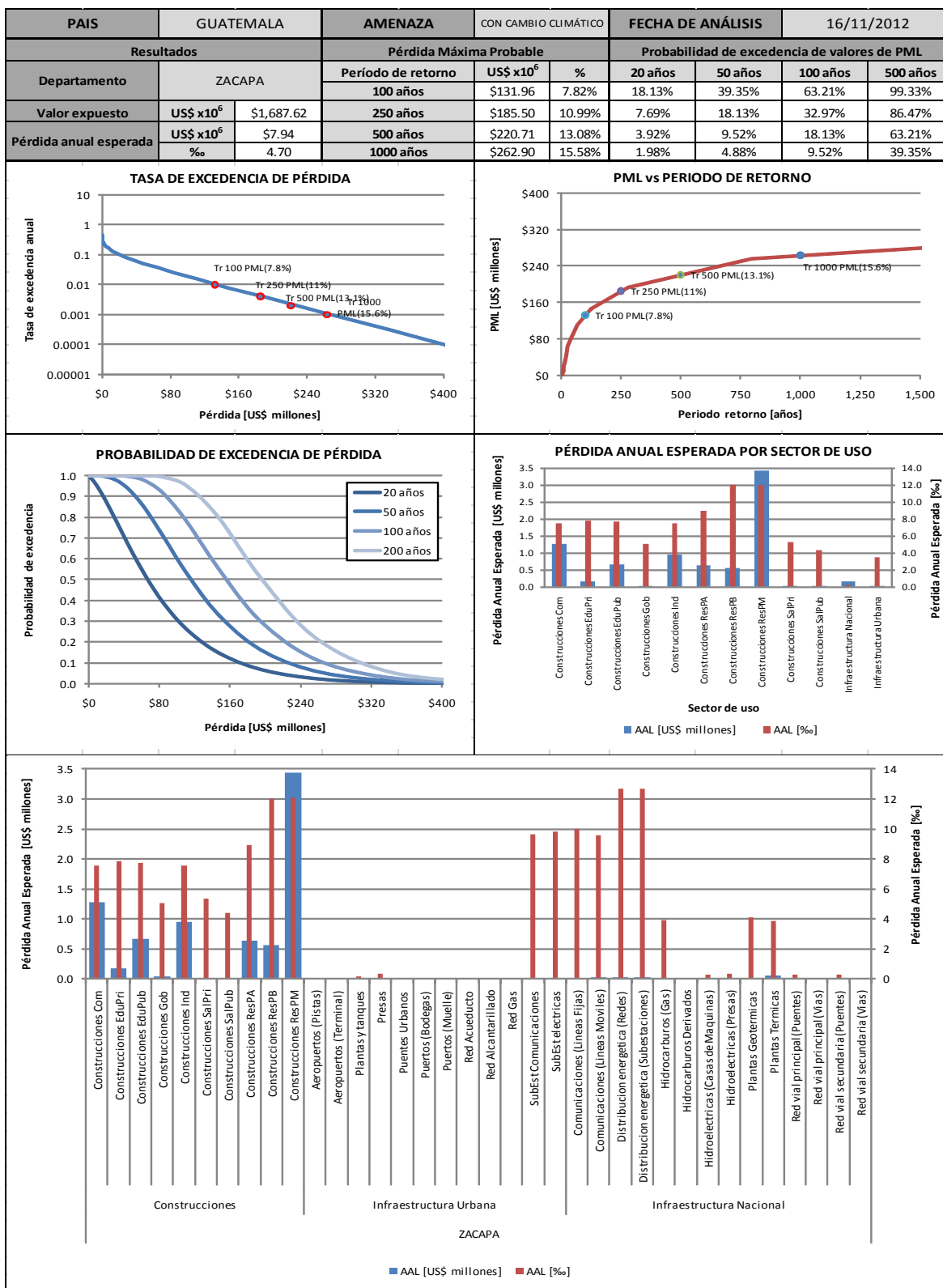












## ANEXO 6. DATASET DE INFORMACIÓN DE GUATEMALA

Anexo digital que contiene todos los archivos empleados en la modelación del riesgo.

Acceso mediante el archivo *Proxi-Guatemala.fdb* (se requiere el software **FileCAT**<sup>5</sup> para leer este archivo)

---

<sup>5</sup>FileCAT es un software gratuito y de libre distribución. Puede descargarse en la página [www.filecat.org](http://www.filecat.org)