CONAMA2012
CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Evaluación del impacto de dos escenarios de inundaciones en el Lago Mälaren (Suecia) mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica

Autor: Estibaliz López-Samaniego

Institución: Asociacion Vertidos Cero

Otros autores: Carlos Menor Salazar (Universidad Autónoma de Madrid)

Resumen

Se ha llevado a cabo una Evaluación del Impacto de las Inundaciones**,** donde se evalúan los efectos del incremento en 100 cm y 225 cm de aumento del nivel del agua del lago Mälaren, el tercero más grande de Suecia, tomando como área de estudio la cuenca hidrológica del río Svartån, donde se encuentra la ciudad de Västerås y su área de influencia.

En particular, se evalúa el riesgo de inundaciones en la población (edificios y bloques residenciales, comerciales e industriales o de servicios) e infraestructuras de comunicación (carreteras, estación y vías de tren, aeropuerto, etc.). A su vez se resumen las consecuencias en el medio ambiente y salud humana al tener en cuenta el riesgo de inundaciones de numerosas industrias peligrosas y los suelos contaminados por metales y otros residuos como los radioactivos.

Se presentan diferentes mapas mediante el uso del Sistema de Información Geográfica ArcGIS10 a dichos escenarios (100 cm y 225 cm de aumento del nivel del agua) como potencial para su uso como herramienta soporte de la correcta planificación urbana y creación de una oficina de información sobre inundaciones, así como proveer un enfoque hacia las mejores estrategias de adaptación frente al Cambio Climático.

Palabras claves: Evaluación del Impacto de las Inundaciones, Sistemas de Información Geográfica, lago Mälaren, suelos contaminados.

1. Introducción

Las inundaciones son un fenómeno natural que se repite con cierta periodicidad en los ciclos hidrológicos. Sin embargo, el Cambio Climático está incrementando dicho patrón temporal en algunas zonas del globo con graves repercusiones sociales y medioambientales.

Debido a la creciente urbanización litoral y costera, las nuevas estrategias de desarrollo y planificación urbana deben contar con la variable de los efectos potenciales del Cambio Climático a medio y largo plazo. De esta manera, herramientas como los Sistemas de Información Geográfica, son clave para realizar diferentes escenarios usando variables socioeconómicas y ambientales.

Desde que el asentamiento *Vastra Aros* fue fundado junto al río Svartån hace más de 1.000 años, la ciudad de Västerås ha crecido hasta convertirse actualmente en la sexta ciudad más poblada de Suecia con 136.000 habitantes. Posee 62.000 edificios y más de 3.700 calles (Departamento de Planificación Urbana, Ciudad de Västerås Stad, 2012). La municipalidad comprende otras áreas urbanas además de la propia ciudad, limitando al sur con el lago Mälaren (Ver ANEXOS – MAPA 1 - Localización).

El lago Mälaren es el tercer lago más grande de Suecia. Con un área de 1.120 km² y 66 metros de profundidad máxima. El lago se sitúa en una cuenca de drenaje de suroeste a noreste hasta desembocar en el Mar Báltico. La región tiene una media de precipitaciones de 600-700 mm/año, una evaporación de 400 mm/año y una escorrentía superficial de < 200 a 250 mm/año (SMHI, 2010).

Históricamente, los niveles de agua del lago han fluctuado con grandes diferencias. Sin embargo, a partir de 1950 empezó su regulación, por lo que la magnitud de las variaciones se redujeron considerablemente (Meier, 2006).

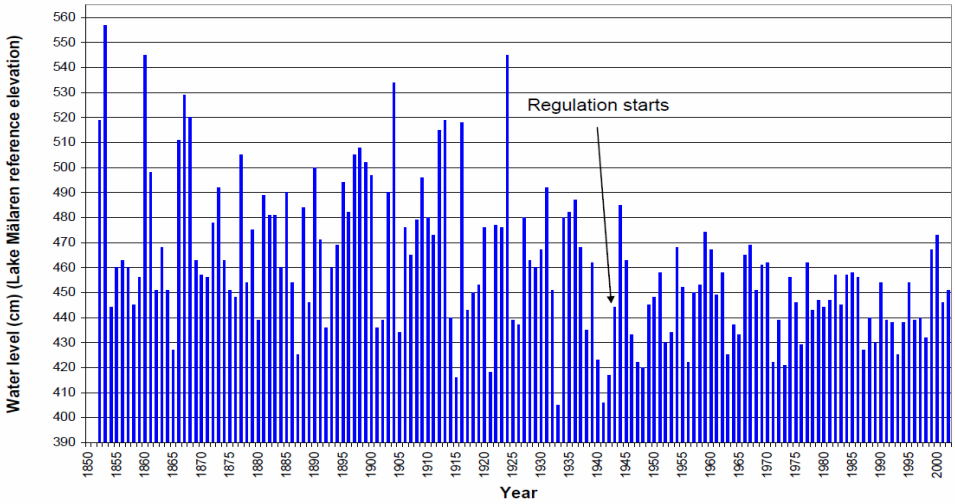


Figura 1. Nivel de agua del Lago Mälaren (1852-2002). (Fuente: Meier et al, 2006)

A pesar de las mejoras en las infraestructuras hidrológicas, el nivel del agua está considerado como un factor ambiental de alto riesgo en la línea de costa que pueda afectar a poblaciones humanas asentadas en ella. Incluso en una predicción a 100 años, se esperan daños en dichas infraestructuras, muy importantes en Estocolmo y ciudades como la Västerås. El Cambio Climático puede incrementar el riesgo de inundaciones en un futuro próximo (SOU, 2006; Meier et al., 2006).

2. Materiales y métodos

Cuando la información sobre las inundaciones y sus efectos es combinada con los diferentes usos del suelo (urbano, industrial, comercial, forestal, etc.), datos socioeconómicos y medioambientales, se obtiene mapas del impacto de las inundaciones que pueden ser usados en campañas de prevención y emergencia ante desastres naturales. Además, dichos mapas apoyan desde un punto de vista técnico las decisiones y planificaciones urbanas, proveyendo de una estimación del riesgo para innovar en el desarrollo sostenible urbano, en escenarios de adaptación al Cambio Climático.

La Evaluación del Impacto de las Inundaciones mediante Sistemas de Información Geográfica se ha basado en los siguientes factores:

- Magnitud de la inundación (aumento del nivel del agua, velocidad y duración).
- Infraestructuras de ayuda a la evacuación (accesos y tiempo de emergencia).
- Tamaño de la población en riesgo.
- Usos del suelo.

Los receptores del presente estudio son los siguientes:

- Población del Término Municipal de Västerås.
  - Población de la ciudad de Västerås
  - Población de distintas islas (e.g.: Tidö-Lindö)
- Gobiernos locales y regionales (e.g.: Västerås Stad)
- Compañías privadas
  - De la propiedad (e.g.: Bostads AB Mimer)
  - De la energía (e.g.: Mälaenergi AB)
  - De los transportes (e.g.: Lokaltrafik AB, servicio de trenes y autobuses; Västerås Flyggplats AB, aeropuerto)
  - Otros (e.g.: Westinghouse Nuclear Electric)

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se ha usado el Sistema de Información Geográfica ArcGIS 10 (ESRI). En la siguiente Figura 2 se indica el proceso seguido:

Figura 2. Esquema de modelización SIG (Fuente: Elaboración propia).

Se han seleccionado herramientas de geoprocesamiento habituales (Disolver, Unir, Clip, Intersección, Buffer,…) teniendo en cuenta si de lo que se trataba eran “shapefile” (colección homogénea de elementos geográficos, llamados “features” simples que no contiene información topológica) de puntos, líneas y/o polígonos (vectorial) con sus atributos asociados.

Se detallan dos ejemplos:

- Para el caso de “Clip”, la “feature dataset” de Västerås (juego de datos de elementos geográficos y colección de “feature clases” que comparten la misma referencia espacial) son polígonos que contiene el mapa de bloques de los tres sectores en la ciudad (urbano, comercial e industrial) que han sido tratados con los datos de inundaciones a los dos escenarios en azul (100 y 225 cm de aumento del nivel del agua). Finalmente los resultados, los bloques inundados, se indican en otro color (rojo).

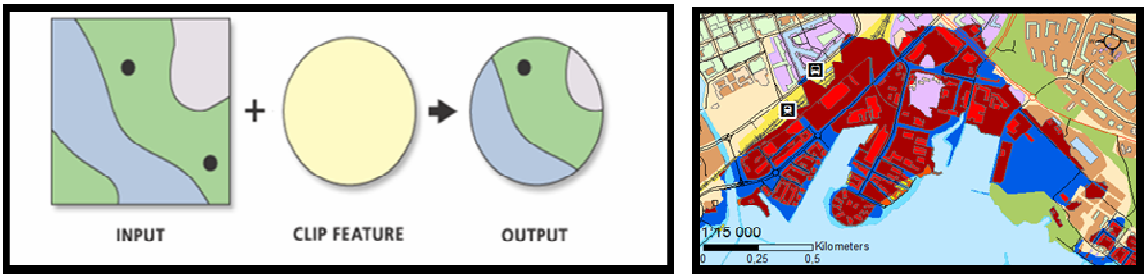


Figura 3. Ejemplo de Clip en Västerås feature dataset (Fuente: Elaboración propia).

- Para el caso de “Buffer”, la “feature dataset” de Västerås ha sido tratada con un buffer de distancia (aprox. 2 km) desde el núcleo en la compañía Westinghouse Nuclear Electric. De esta manera se expresa la influencia de un escenario que involucra un desastre nuclear y su efecto en la población y lago Mälaren.

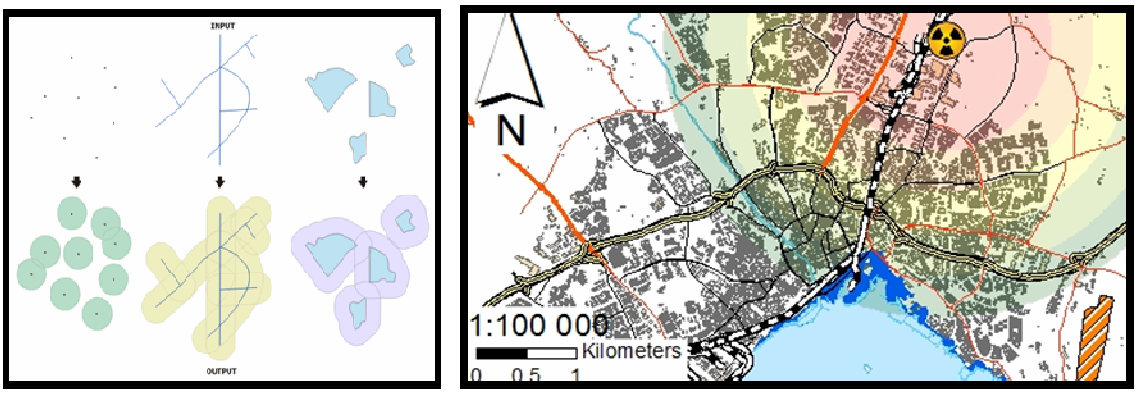


Figura 4. Ejemplo de Buffer en Västerås feature dataset (Fuente: Elaboración propia)

3. Resultados y Discusión

Superficie inundada

El Escenario A (100 cm) inundaría una superficie de 15,3 km^2 en el municipio de Västerås mientras que en el Escenario B (225 cm) inundarían 30,2km^2 (Figura 5). Se trata de una superficie considerable si tomamos en cuenta que el término municipal de Västerås tiene un área 62,7 km^2 (Ver ANEXOS – MAPA 2 - Escenarios de Inundaciones).

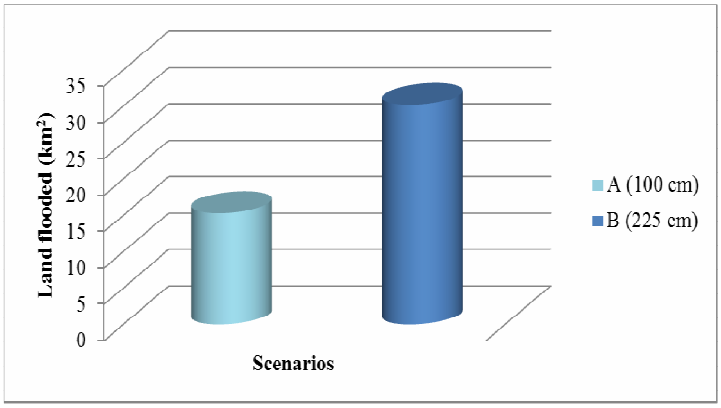


Figura 5. Superficie inundada (km^2) en el término municipal de Västerås.

En cuanto a población, Västerås tiene 136.000 habitantes considerando no solo la ciudad sino también sus alrededores. En el Mapa 3, expresado mediante una base de datos en modelo coroplético, indica la cantidad de gente que se vería directamente afectada por una inundación (Ver ANEXOS – MAPA 3 - Población). Las diferencias de impacto entre el centro de la ciudad y sus alrededores se explican por la presencia de pequeñas casas y residencias secundarias en el campo y cerca del lago (Figura 6). Sin embargo, las herramientas de geoprocesamiento usadas en el presente trabajo no pueden evaluar con exactitud el número de personas viviendo en la ribera del lago que se verían afectadas por una inundación.

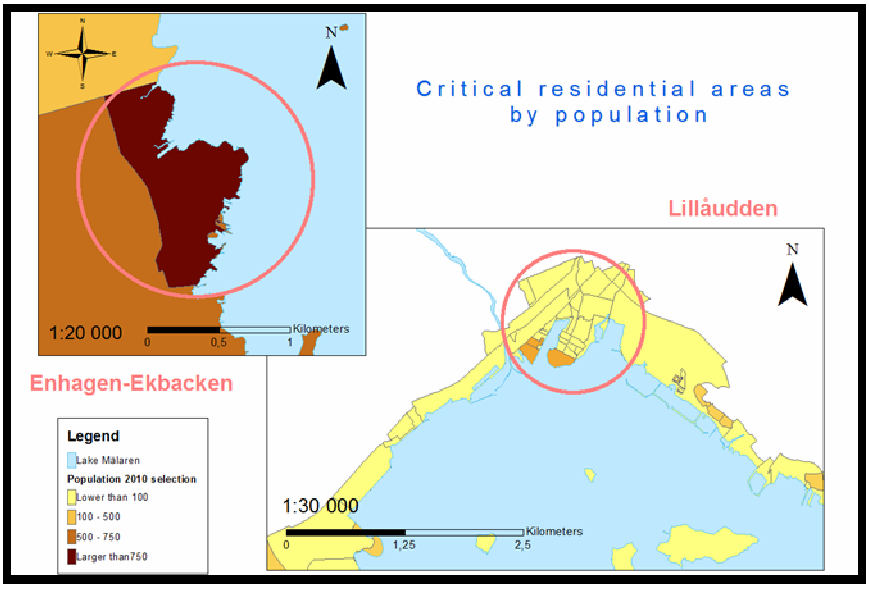


Figura 6. Áreas residenciales críticas con alto riesgo de inundación.

<u>Líneas de comunicación</u>

El impacto que provocaría el Escenario A (100 cm) sobre las infraestructuras de comunicación es limitado. Sin embargo en el Escenario B (225cm) pueden provocar daños en las planicies costeras y en los puentes que comunican con núcleos urbanos de las islas. Se observan también los efectos en los puertos deportivos y de ocio de Västerås: todos se verían inundados en cualquiera de los escenarios (Ver ANEXOS – MAPA 4 – Efectos sobre las infraestructuras).

- Aeropuerto

El aeropuerto principal de Västerås, cuya superficie total es de 1,03 km^2, estaría afectado en ambos escenarios. En el Escenario A (100 cm) unos 0,15 km^2 se verían afectados y 0,30 km^2 en Escenario B (225 cm). En tal caso, significa que un tercio de la superficie del aeropuerto estaría inundada y que el aeropuerto se debería cerrar por situación de emergencia. Sin embargo, ninguno de ambos escenarios afectaría al aeropuerto secundario de ocio: tan solo 0,03 km^2 estarían inundados en el primer caso y 0,09 km^2 en el segundo caso, afectando tanto a la pista de despegue como a la de aterrizaje (Figura 7).

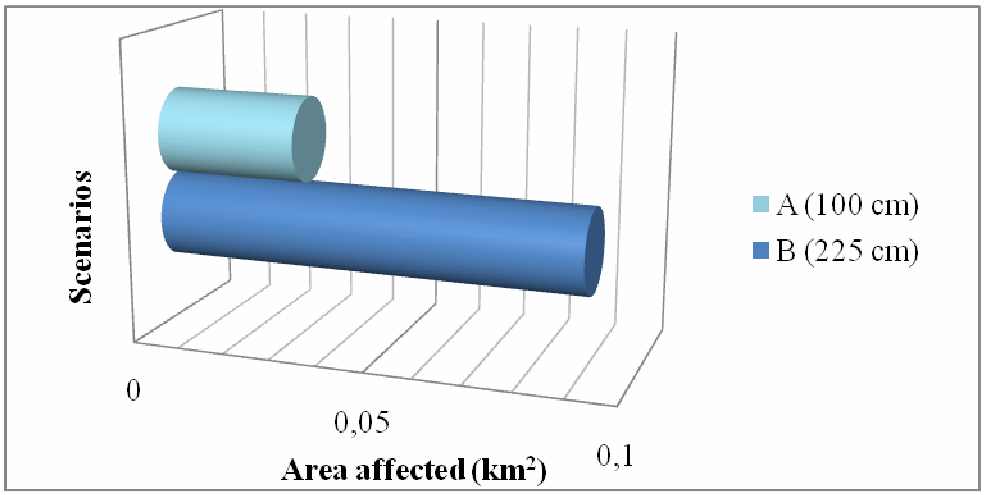


Figure 7. Área afectada (km^2) de ambos aeropuertos.

- Ferrocarriles

El Escenario A (100 cm) no generaría ningún tipo de impacto en las infraestructuras ferroviarias. Sin embargo, con el Escenario B (225 cm) muchas zonas se verían inundadas. La principal zona afectada sería la estación principal de Västerås (Centralstation) que se vería muy dañada y provocaría un caos en términos de transporte (acceso y emergencias).

- Carreteras

En el Escenario A (100 cm), los más afectados serían los caminos de tierra y las calles privadas puesto que se encuentran principalmente en la ribera del lago. Por otro lado, en el Escenario B (225 cm) afectarían también las calles y carreteras principales: la autopista nacional y calles de la ciudad de Västerås (e.g.: Kungsänsgatan).

En las afueras, pasaría lo mismo con la principal carretera del sur hacia el término municipal de Eskilstuna, en su paso por la isla de Kvicksund como se observa en la Figura 8.

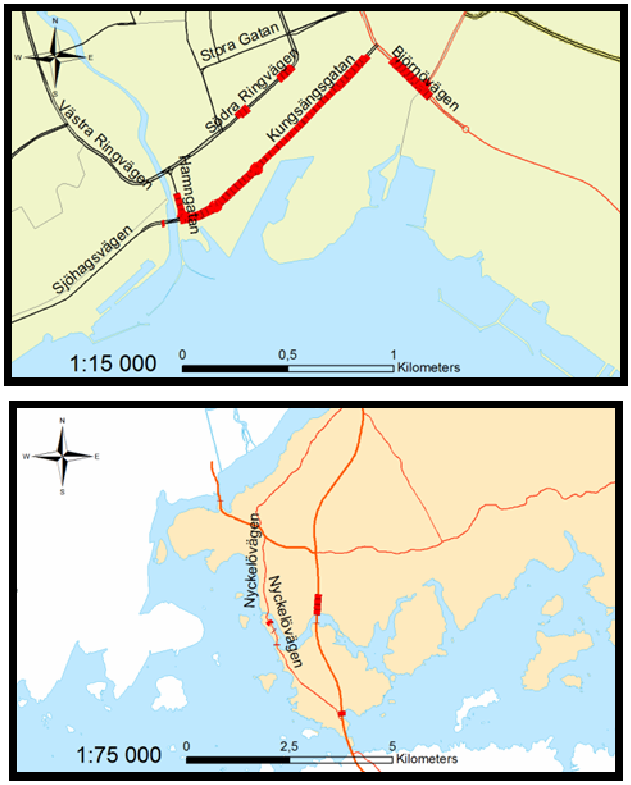


Figure 8. Principales carreteras afectadas en el Escenario B (225 cm) (imagen superior, centro ciudad; imagen inferior, carretera hacia el sur-Eskilstuna)

Bloques y edificios

El Mapa 5 (Ver ANEXOS – MAPA 5 – Efectos sobre bloques y edificios) indica con diferentes zooms los escenarios de inundación en el municipio de Västerås: Lillåudden, el aeropuerto, la zona industrial y la zona residencial. Se amplía en estas zonas porque son las que estarían más afectadas y porque tienen características muy diferentes. Permite así proponer una evaluación de riesgos para diferentes tipos de edificios: residenciales, comerciales e industriales:

- Lillåudden. Esta zona se formó en el pasado por la gran acumulación de residuos de origen industrial (1925-1964) hasta crear una nueva península en Västerås. Actualmente se han edificado nuevos bloques residenciales, pero los riesgos de inundación son elevados.
- Zona industrial. Mälaenergi AB Västerås, Mälarhamnar AB y Svenska Växtkraft AB industries se encuentran en esta zona. Serían las más afectadas en caso de una subida de 225 cm.

- Zona residencial (Enhagen-Ekbacken). Esta zona está situada a 8 km del centro de Västerås, construida en una pequeña bahía. Se ha elegido esta zona entre otras (como por ejemplo otros islotes como Tidö-Lindö ó Kvicksund) por tener más edificios (pequeños y residencias secundarias) construidos en la ribera del lago.

La cantidad total de bloques inundados en el Escenario A (100 cm) sería de 117 y en el B (225 cm) de 171. Aunque no parece haber mucha diferencia, si son clasificados por tipología de edificios (residencial, industrial y comercial) y representados en las zonas inundadas, se puede apreciar la diferencia con más precisión.

Table 1. Bloques afectados

	Escenario A (100 cm)	Escenario B (225 cm)
Nº Total de bloques afectados	117	171
Bloques (m^2)		
Residencial	198.000	603.000
Industrial	63.000	532.000
Comercial	1.000	63.000
Total	262.000	1.198.000

En el Escenario A, los principales afectados serían los edificios residenciales (76%) mientras que en el B las zonas residenciales representarían el 50% de las zonas afectadas y las industriales un 46%. Los bloques comerciales estarían en riesgo sólo en caso de grandes inundaciones (5%) (Figura 9).

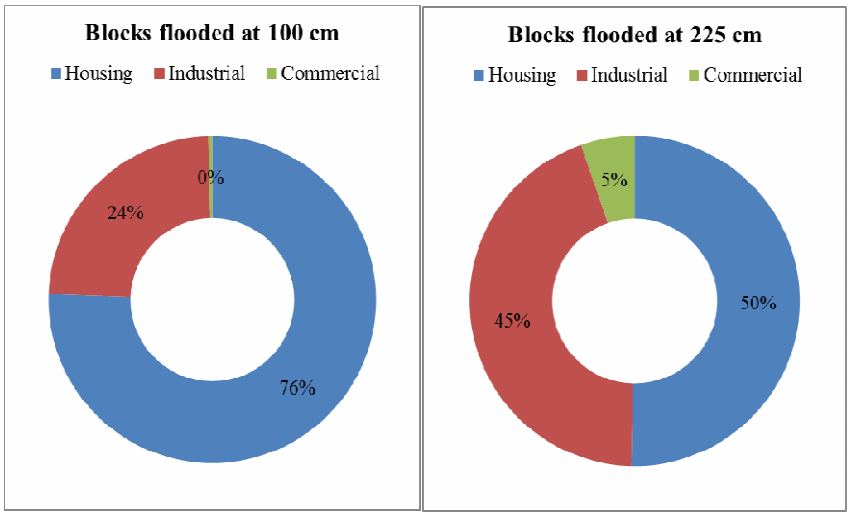


Figura 9. Área (%) de bloques afectados.

Dentro de las distintas categorías de bloques, los edificios que potencialmente tienen mayor riesgo son los industriales y los apartamentos residenciales, como se comentó anteriormente (Figura 10).

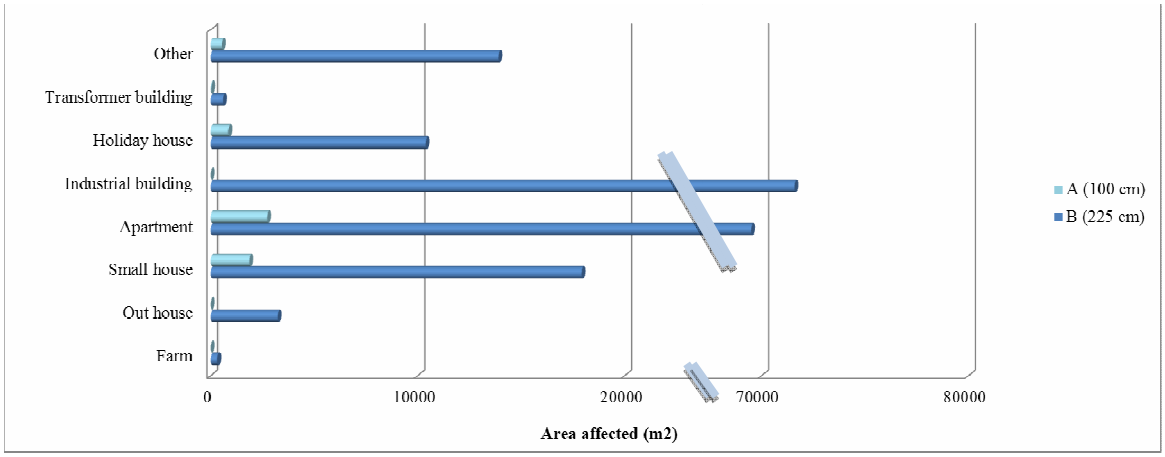


Figura 10. Área (m^2) de edificios afectados.

Por lo tanto, el enfoque de la Evaluación de los Impactos de las Inundaciones tiene que ser prioritario estas zonas residenciales cerca del litoral del lago Mälaren. Es clave que los estudios actuales y futuros de impacto medioambiental introduzcan en sus análisis los riesgos de inundación en estas poblaciones emergentes.

Por último, cada ciudad tiene que establecer un perímetro de protección y seguridad cerca de la costa. El desarrollo urbanístico tiene que considerar no solo los parámetros ecológicos de dichos perímetros sino también la protección humana. Prevaleciendo el principio de prevención.

Consecuencias en la salud humana e impactos medioambientales

La Evaluación de los Impactos de las Inundaciones considera suelos contaminados e industrias peligrosas, ya que sus efectos nocivos sobre el lago Mälaren y provocar severas consecuencias sobre el medioambiente y la salud humana (Ver ANEXOS – MAPA 6 – Efectos sobre suelos contaminados e industrias).

En la península artificial de Lillåudden, actual zona residencial, y área costera próxima con nuevos puertos de ocio, convergen varios impactos ambientales:

- Vertedero industrial incontrolado (1915-1994), el cual formó la península.
- Antigua estación de refinería de carbón (1927-1963) y reformada en gas (1974).
- Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de la ciudad.
- Compañía Westinghouse Nuclear, con riesgo radioactivo (buffer perimetral de influencia de 2 km).

Dentro del tejido industrial próximo a la línea de costa, Mälaenergi Västerås AB, Mälarhamnar AB y Svenska Växtkraft AB son las industrias que podrían ser afectadas por unas inundaciones de 225 cm mientras que sólo las 2 primeras podrían ser parcialmente afectadas en caso de una inundación de 100 cm. Por lo tanto, deberían tener planes especiales de gestión y tratamiento tanto de la producción como de los residuos generados (correcto almacenamiento en islas ecológicas de productos peligrosos, explosivos, etc.). Por otro lado, Westinghouse Sweden Electric AB, aunque lejos del Lago Mälaren (a unos 4 km aproximadamente), tiene un alto ratio de contaminación potencial por radiación en el peor de los escenarios. No sólo afectaría al municipio de Västerås sino que contaminaría el lago por sus partículas radioactivas.

Se realizaron dos trabajos de remediación (liderados por las empresas Terratema AB, 1995; Mälaenergi 2010; con colaboración en proyectos de investigación en la Universidad de Mälardalen) para la extracción de hasta dos metros de profundidad del suelo en Lillåudden. Los análisis indican suelos contaminados y lixiviados con alto contenido en metales pesados (Cd, Cr, Cu, Zn, Sn) hidrocarburos poliaromáticos (PAH) y alifáticos.

En la Figura 11, una inundación de 225 cm cubriría varios puntos contaminados (unos 35 aproximadamente). Esta zona todavía tiene un alto nivel de contaminación debajo de una capa de arena y gravera de 1-2 metros. Si se erosiona esta capa (provocada por la inundación), la situación sería muy grave.

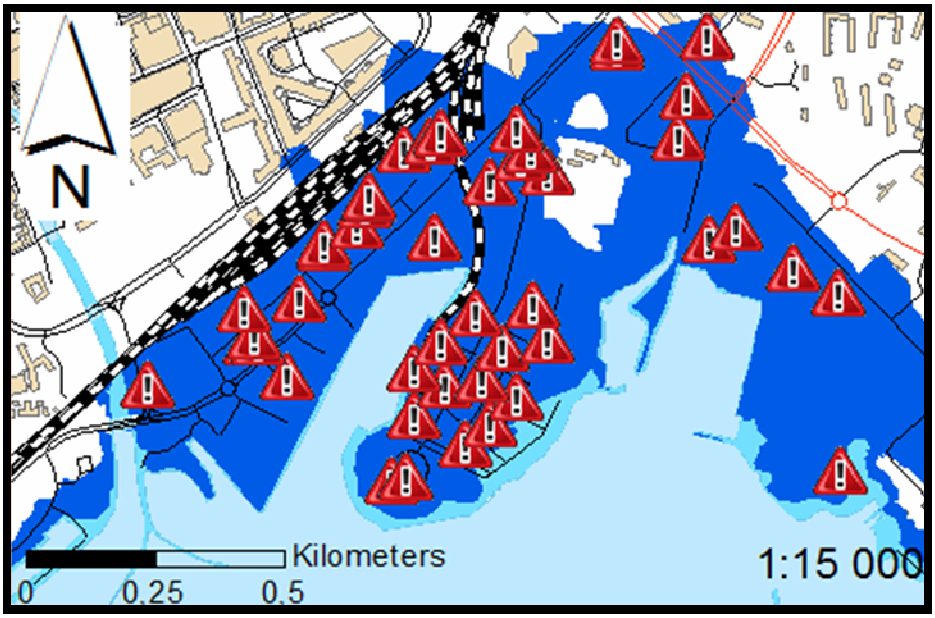


Figura 11. Puntos de suelos contaminados en el área de Lillåudden.

Bioensayo en sedimentos contaminados

Un bioensayo, Ostracodtoxkit F, con el crustáceo *Heterocypris incongruens* en muestras de sedimentos de Lillåudden (Menor *et al*., 2012, pers. comm.) indicó alta mortalidad e inhibición del crecimiento en comparación con la muestra control (Figura 12).

Los seis días de exposición por contacto y/o ingesta crónica en el bioensayo ha sido probado como un método sensible, fiable y de bajo coste muy simple de usar para evaluar ecotoxicológicamente muestras de sedimento en el laboratorio (Ostracodtoxkit F., 2001).

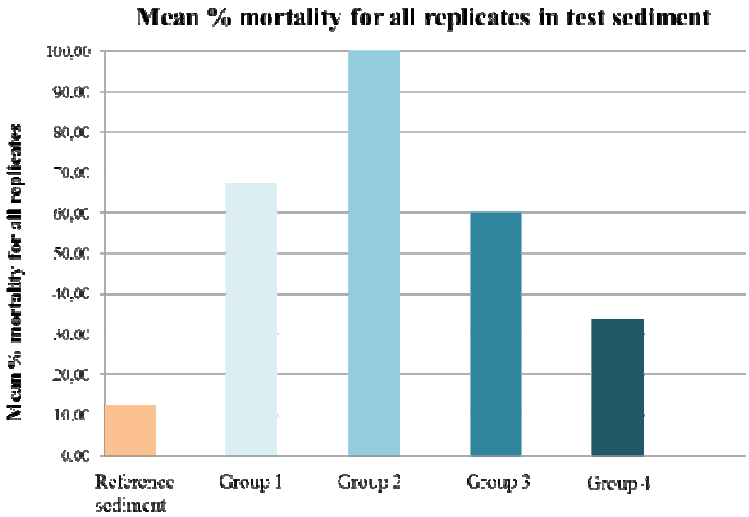


Figura 12. Medias de los porcentajes de mortalidad de ostrácodos en muestras de sedimento.

Para la evaluación se siguió los valores-guía establecidos por la Swedish EPA (1999, 2009) (Tablas 2 y 3).

Tabla 2. Sistema de evaluación para test de ecotoxicidad. Niveles de inhibición del crecimiento comparados con la muestra control (Swedish EPA, 2009).

Toxic effect	Inhibition in comparison to control
No or very low effect	0 – 20%
Low effect	20 – 50%
High effect	50 – 75%
Very high effect	75 – 100%

Tabla 3. Porcentaje de inhibición del crecimiento. Datos obtenidos en el estudio de Menor *et al.,* (2012) usando *Heterocypris incongruens.*

TEST SEDIMENT	GROUP 1	GROUP 3	GROUP 4

Mean % growth inhibition in test sediment	85,89	54,78	56,92
Inhibition effect (Swedish EPA, 2009)	Very high	High	High

Limitaciones del análisis

Todos los modelos están sujetos a errores e imprecisiones. Por lo tanto, las estimaciones pueden variar según las distintas formas de evaluar el problema. Esto puede llevar a infraestimar o sobreestimar el riesgo real según la ubicación y proximidad a la línea de costa del lago Mälaren.

4. Conclusiones

Los Sistemas de Información Geográfica son herramientas potentes para la toma de decisiones en el ámbito de la ordenación del territorio, así como medidas de prevención y protección. La capacidad de evaluación de zonas de alto riesgo por inundación depende de varios factores como la estructura de los edificios, el acceso a infraestructuras de comunicación, la disponibilidad de suministros de emergencia y la exposición al azar medioambiental. Por esto, es necesario tener una Evaluación de Impactos por Inundaciones en el Lago Mälaren y urbes más pobladas en su perímetro como Västerås.

Generando diferentes escenarios de inundaciones, se puede observar los efectos en las zonas costeras y litorales y el impacto socioeconómico y ambiental. Este informe ha enseñado varios elementos críticos que se tienen que tomar en cuenta: población, infraestructuras de comunicación, edificios, terreno contaminado e industrias peligrosas. Todos enseñan niveles de riesgo bajo en el Escenario A (100 cm) pero alto en el Escenario B (225 cm).

Entre las limitaciones del análisis, cabe reconocer que cualquier modelo está sujeto a imprecisiones en las estimaciones del riesgo. Para evaluar los efectos sobre el lago Mälaren desde el punto de vista medioambiental serían necesarios más datos de variables hidromorfológicas y biológicas, para complementar además de los ensayos ecotoxicológicos como los aportados en el presente trabajo. No obstante, estos resultados preliminares son muy valiosos a la hora de realizar una Evaluación del Impacto de las Inundaciones en el Lago Mälaren.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado gracias a las capas SIG provistas por la Universidad de Mälardalen en colaboración con el gobierno local y regional de Västerås, así como expresar el agradecimiento a Tom Blackmore, de la empresa ARCTIGER.

Referencias

Mälaenergi AB. 2010. Sedimentprovtagning i Kraftverksviken,Västerås. Resultat från tre stycken provtagningstillfällen. Rapport 2010-02-25.

Meier, H.E.M., J. Andréasson, B. Broman, L.P. Graham, E. Kjellström, G. Persson, and M. Viehhauser. 2006. Climate change scenario simulations of wind, sea level, and river dischargein the Baltic Sea and Lake Mälaren region – a dynamical downscaling approach from global to local scales. SMHI Reports Meteorology and Climatology No.109, SMHI, SE-601 76 Norrköping, Sweden, 52 pp.

Menor, C., Cáceres, L., Villarrubia, P., Fontana, P. 2012. Ecological characterization of sediments using the ostracod "*Heterocypris incongruens*" in Lake Mälaren (Västerås, Sweden). *Pers. Comm.*

Ostracodtoxkit F. 2001. Chronic "direct contact" toxicity test for freshwater sediments. Standard operational procedure. Deinze, Belgium: Creasel. 18 pp.

Statens Offentliga Utredningar, SOU. 2006. Översvämningshot – Risker och Åtgärder för Mälaren, Hjälmaren och Vänern. 2006:94

Swedish Environmental Protection Agency. 1999. Series ranking criteria for environmental quality. Methodology for the inventory of contaminated sites. Report 4918.

Swedish Environmental Protection Agency. 2009. Application of methodology for ecological risk assessment of contaminated sites. Report 5886.

Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) website: http://www.smhi.se/en

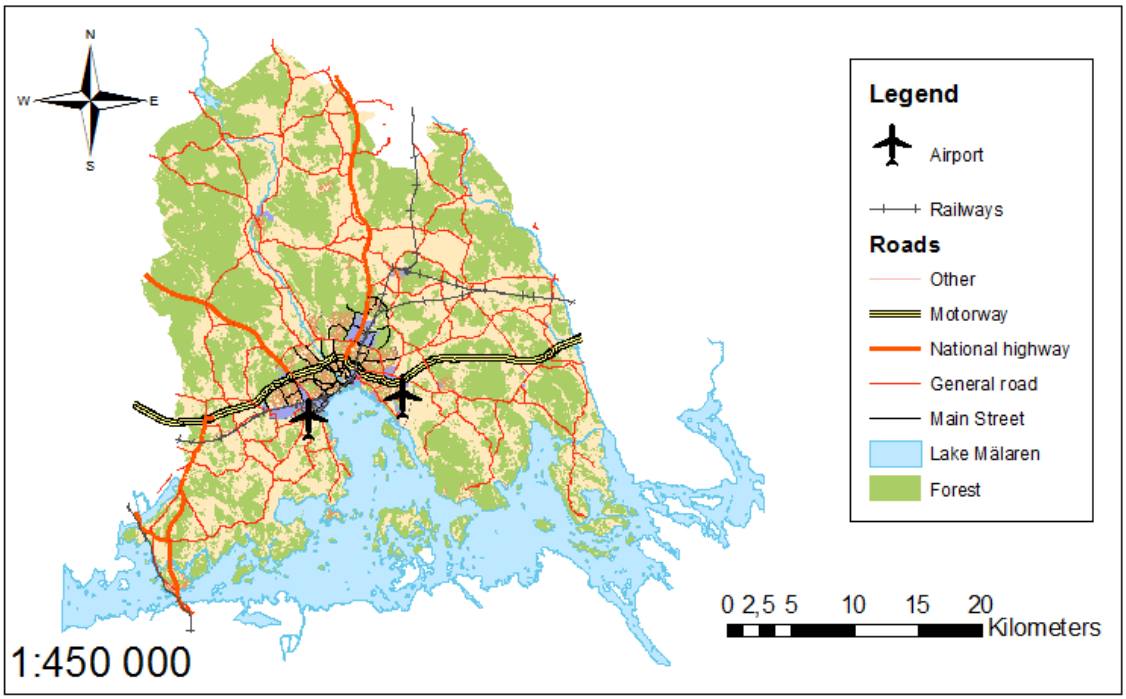
Terratema AB. 1995. Undersökningar av förorenade bottensedimentt. Lillåudden - Västerås hamn.

Urban Planning Department. Västerås Stad website: http://www.vasteras.se/

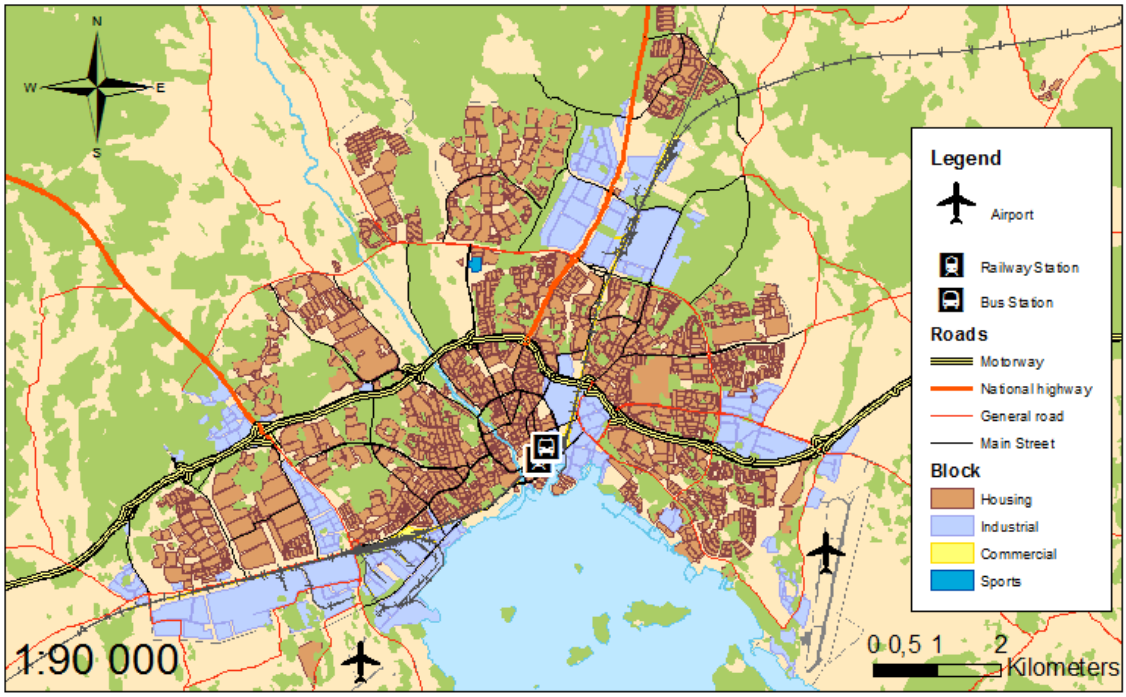
ANEXOS (MAPAS)

Mapa 1. Localización

VÄSTERÅS MUNICIPALITY

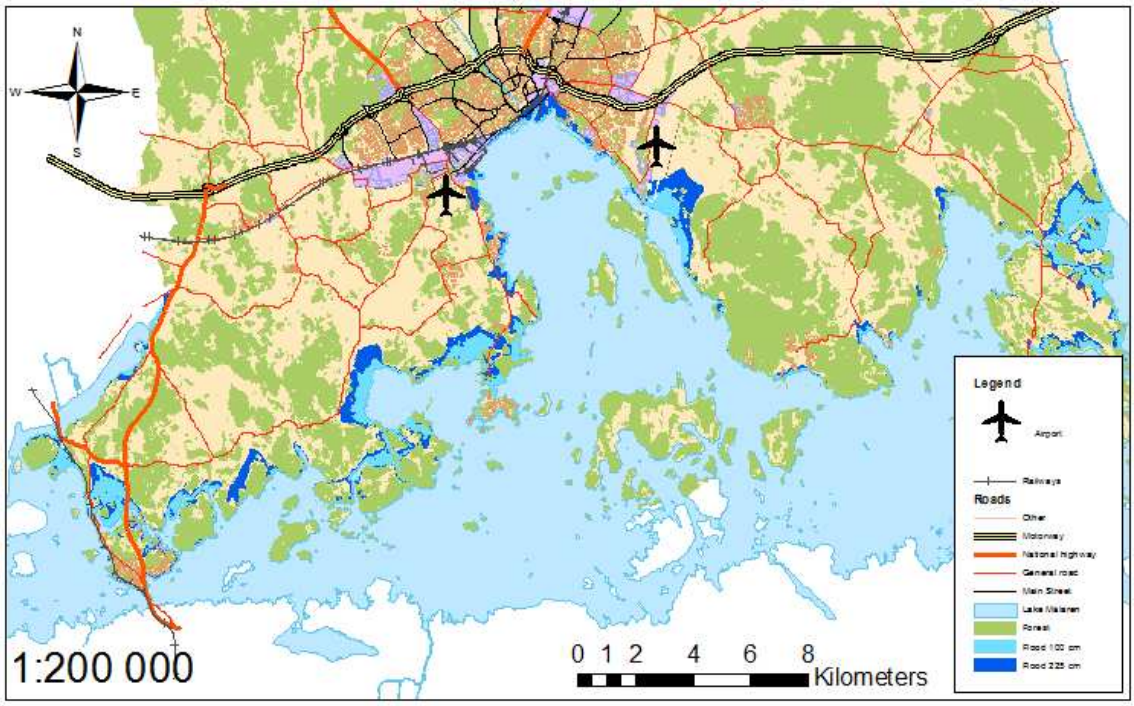


VÄSTERÅS CITY



Mapa 2. Escenarios de inundación

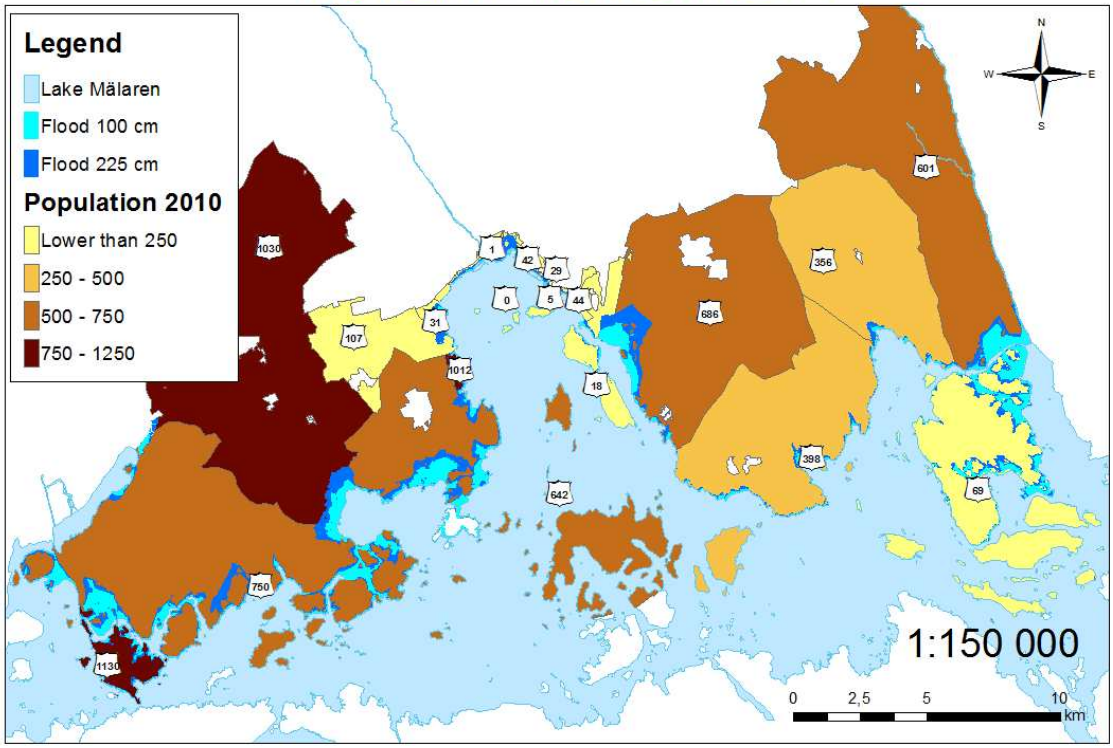
VÄSTERÅS MUNICIPALITY



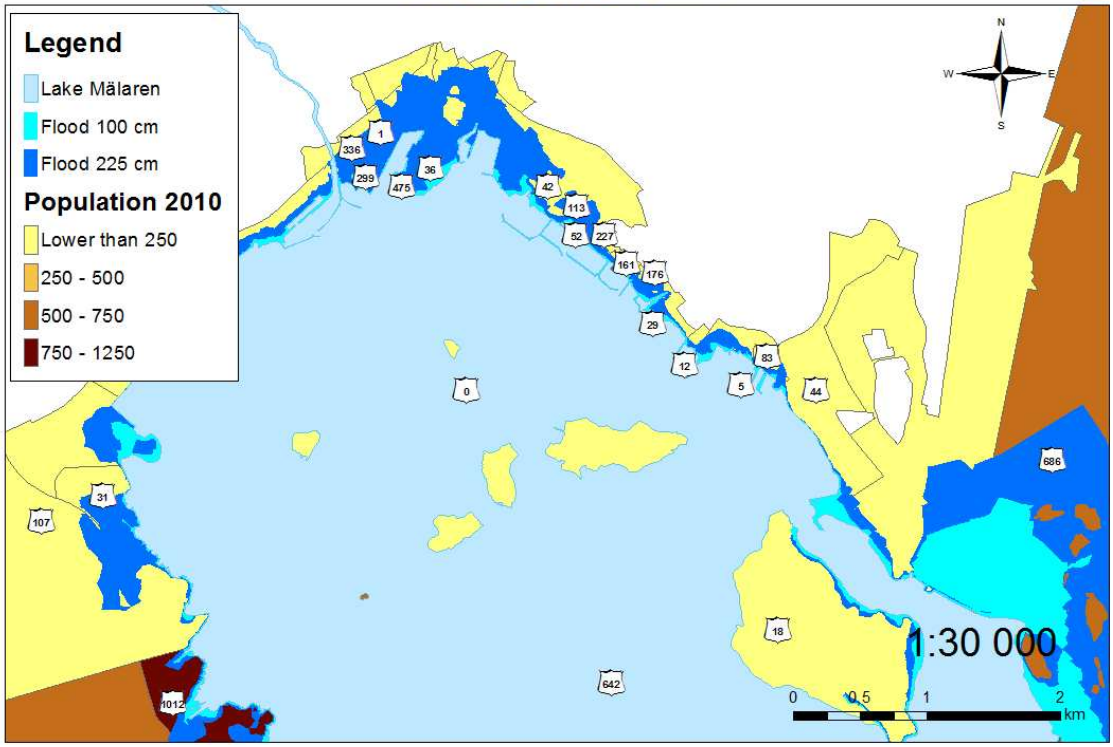
VÄSTERÅS CITY

Mapa 3. Población

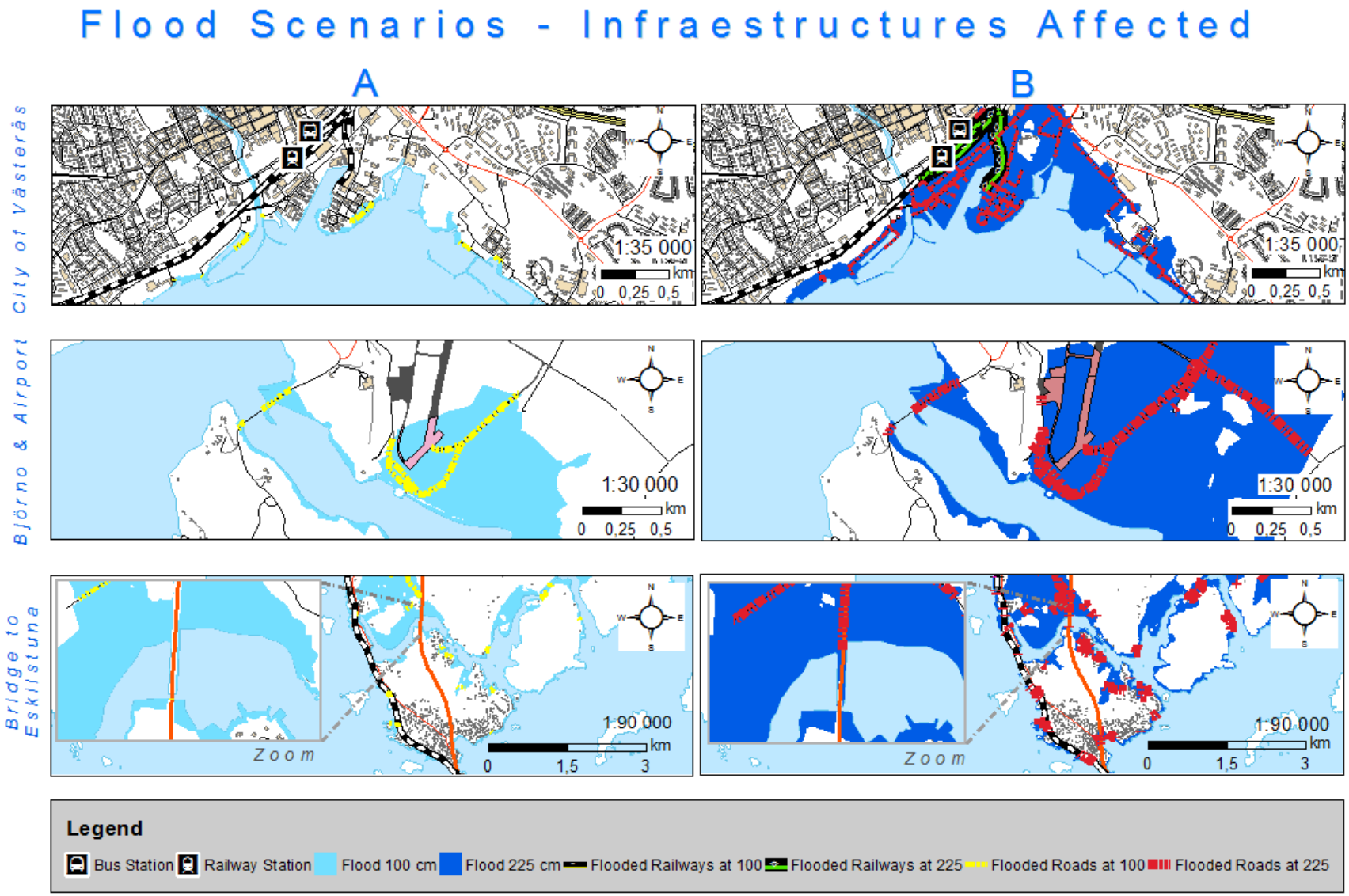
VÄSTERÅS MUNICIPALITY



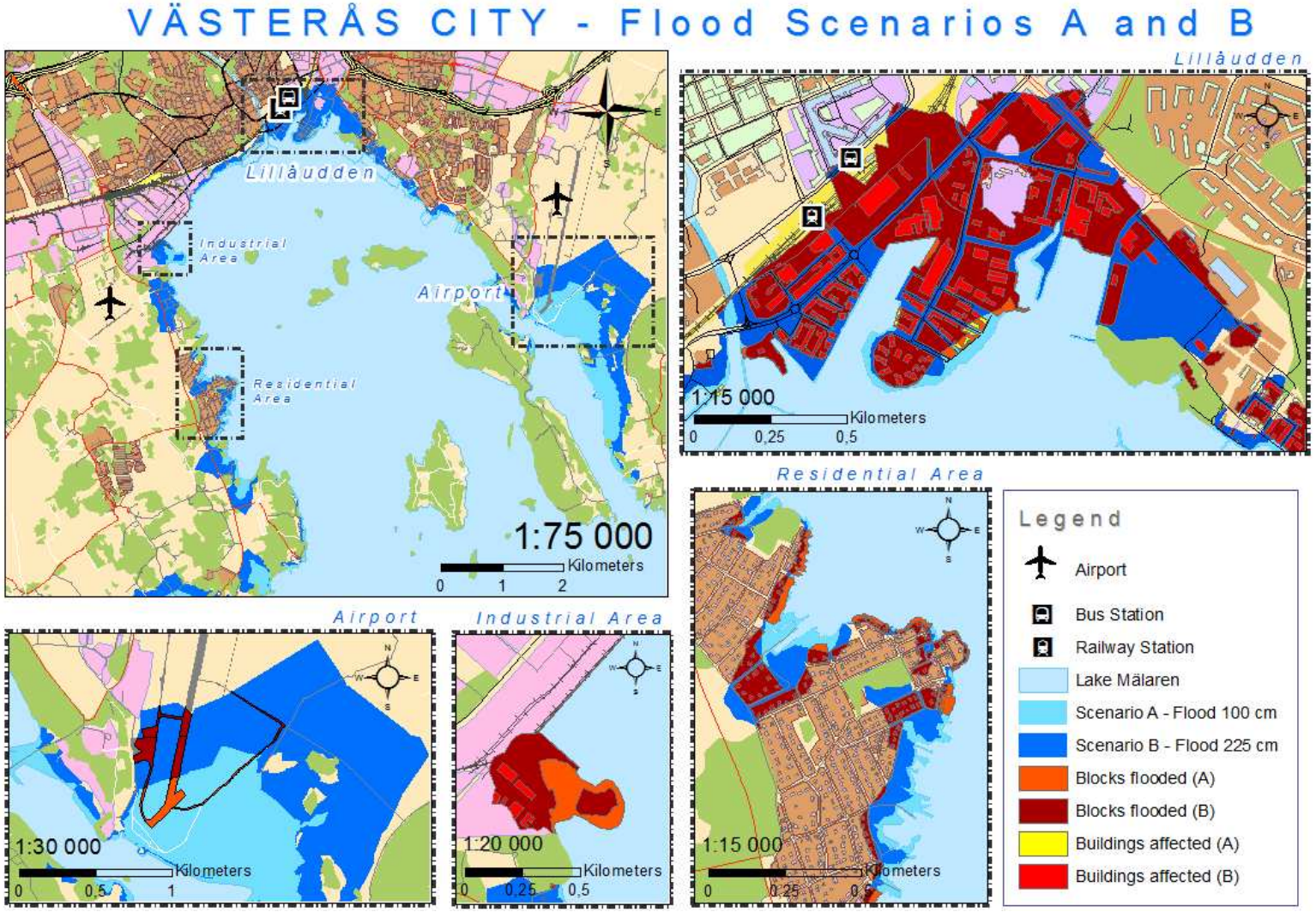
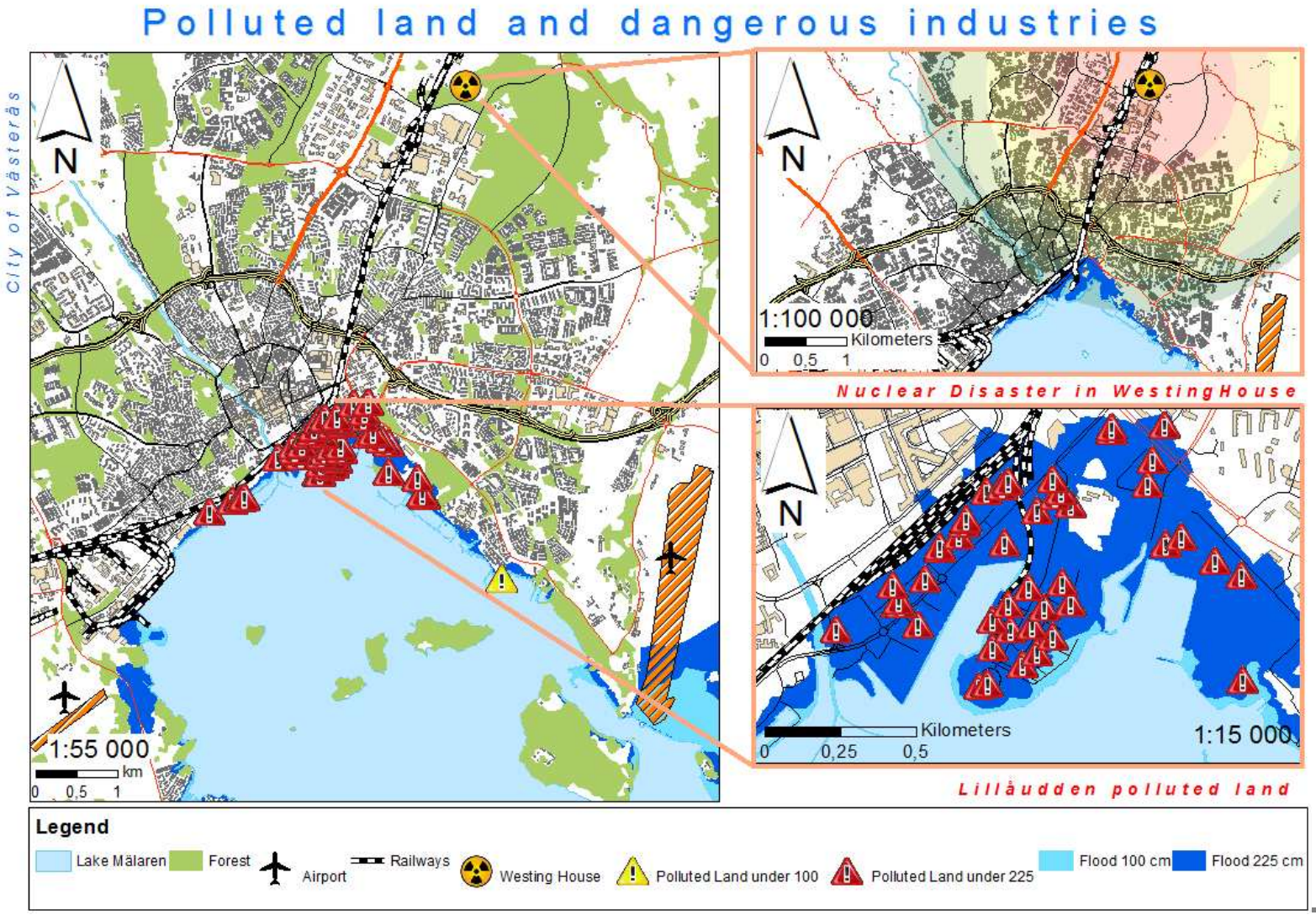
VÄSTERÅS CITY



Mapa 4. Efectos sobre las infraestructuras



Mapa 5. Efectos sobre bloques y edificios



Mapa 6. Efectos sobre suelos contaminados e industrias