

RESUMEN

La creciente vulnerabilidad a los desastres naturales y la presión humana sobre los recursos naturales han incrementado la necesidad de observar y monitorizar el medio ambiente. La disponibilidad de información en tiempo real para una apropiada toma de decisiones es fundamental para proteger vidas humanas y recursos naturales. En este ámbito, las redes móviles de sensores, como por ejemplo las redes inalámbricas de sensores, prometen ser los sistemas de observación capaces de obtener dicha información de una forma flexible y autónoma. Las redes móviles de sensores se componen de sensores geográficamente esparcidos muy cerca del fenómeno de interés. Estos sensores son autónomos, auto-configurables, pequeños, ligeros, con energía limitada y se transforman en sensores móviles cuando son acoplados a objetos móviles tales como robots, personas y bicicletas.

La investigación sobre redes de sensores móviles se ha centrado principalmente en la utilización de la movilidad de sensores para mejorar las principales limitaciones de una red de sensores como son la topología de la red, la conectividad y la conservación de la energía. Sin embargo, la utilización de esta movilidad para mejorar la monitorización del medio ambiente sigue siendo en gran parte inexplorada. Para abordar este reto es necesario considerar dos aspectos principales de la movilidad: el muestreo móvil y las restricciones a la movilidad. El muestreo móvil se refiere a *dónde* los sensores móviles se deben mover, mientras que las restricciones a la movilidad se refieren a *cómo* este movimiento debe ser manejado teniendo en cuenta el contexto en el que se realiza la monitorización. Esta tesis explora métodos de movilidad de sensores dentro de una red inalámbrica de sensores para ser utilizada en la monitorización medio ambiental. Para lograr este objetivo, cuatro sub-objetivos han sido definidos:

1. explorar el uso de metadatos para describir los estados dinámico de las redes de sensores;
2. desarrollar un modelo de restricciones a la movilidad para inferir comportamientos de los sensores móviles;
3. Desarrollar un método para adaptar el muestreo espacial utilizando sensores móviles restringidos;
4. extender el método de muestreo desarrollado en el objetivo 3 para monitorizar fenómenos medio ambientales que son altamente dinámicos.

El Capítulo 2 explora el uso de metadatos para describir los estados dinámicos de las redes de sensores. Un modelo de contexto es propuesto para describir la situación general en la que una red de sensores está monitorizando. El modelo se compone de cuatro tipos de contextos: del sensor, de la red, de la monitorización y de la organización. Cada uno de los contextos describe la red de sensores desde una perspectiva diferente. Los metadatos, definidos como descriptores de los datos observados, configuraciones de sensores y funcionalidades, se utilizan como parámetros para describir lo que sucede en los diferentes contextos. Los resultados revelaron que la utilización de los metadatos es apropiada para describir el estado de una red de sensores considerando los diferentes contextos, y para informar sobre este estado a los otros componentes, sistemas o usuarios.

El Capítulo 3 desarrolla un modelo que describe restricciones a la movilidad para ser usadas en la inferencia del comportamiento de sensores móviles. El modelo

propuesto consta de tres componentes: primero, la tipología de contexto presentada en el Capítulo 2 es usada para describir las restricciones a la movilidad en los diferentes contextos; segundo, un grafo contextual, modelado como una red bayesiana, es usado para codificar dependencias entre las restricciones a la movilidad tanto dentro del mismo contexto, como entre contextos diferentes, así también entre las restricciones y los posibles comportamientos; y tercero, reglas contextuales son usadas para codificar cómo se espera que las restricciones a la movilidad restrinjan el comportamiento de los sensores. Los metadatos que describen el fenómeno monitorizado y las propiedades de los sensores son utilizados para alimentar al grafo contextual, los cuales se propagan siguiendo la estructura de grafos, mientras que las reglas contextuales infieren el comportamiento más adecuado. El modelo fue utilizado para simular el comportamiento de una red de sensores móviles con el fin de obtener una cobertura espacial adecuada en situaciones de bajo y alto riesgo de incendio forestal. Se demostró que el modelo de restricciones a la movilidad exitosamente infiere comportamientos tales como dormir sensores, mover sensores, o desplegar más sensores para mejorar la cobertura espacial.

El Capítulo 4 desarrolla un método de muestreo espacial para ser usado con sensores móviles restringidos, el cual se basa en el valor esperado de la información (VEI) y las restricciones a la movilidad. El VEI permite tomar decisiones sobre la localización a observar de tal forma que se minimice el costo esperado de realizar predicciones erróneas acerca del fenómeno. Un criterio basado en la agregación espacial del VEI es propuesto. Las restricciones a la movilidad permiten tomar decisiones sobre qué sensor debe moverse. Un criterio de costo ponderado con la distancia a recorrer es propuesto para minimizar los efectos no deseados que la movilidad del sensor puede provocar en la red de sensores, como por ejemplo el agotamiento de la energía. Como forma de evaluación, el método fue comparado con una selección aleatoria de localizaciones de muestreo combinada con la selección del sensor a mover en base a un criterio de mínima distancia Euclíadiana. Los resultados demostraron que el VEI permite seleccionar los lugares que son más informativos, mientras que las restricciones a movilidad proporcionan el contexto necesario para seleccionar el sensor que se moverá.

El Capítulo 5 extiende el método desarrollado en el Capítulo 4 para el caso de fenómenos muy dinámicos. El método decide cuándo y dónde tomar muestras de un fenómeno dinámico con sensores móviles. El criterio de optimización es la maximización del valor esperado de la información (VEI) de una nueva distribución espacial de sensores en un momento dado. El método fue demostrado con un ejemplo simulado en el que el incendio de una fábrica de productos químicos libera humo contaminado a la atmósfera. El penacho de humo varía en el espacio y en el tiempo debido a variaciones en las condiciones atmosféricas y podría ser sólo parcialmente estimado por un modelo determinista de dispersión. En este ámbito, las observaciones in-situ adquiridas por los sensores móviles se utilizan para mejorar las predicciones del modelo determinista. Como forma de evaluación, el método fue comparado con movimientos aleatorios de sensores y con la distribución espacial previa de los sensores, es decir sin realizar ningún movimiento. Los resultados pusieron de manifiesto que la utilización del VEI para optimizar la movilidad de sensores reduce exitosamente el riesgo causado por las predicciones parciales del modelo determinista.

El Capítulo 6 sintetiza los principales hallazgos y mis reflexiones sobre las implicaciones de estos hallazgos. El muestreo medio ambiental con sensores móviles es importante para seleccionar y observar las localizaciones que más contribuyen con la

mejora de la calidad de las decisiones orientadas a la protección de vidas humanas y recursos naturales. Las restricciones a la movilidad son relevantes para gestionar la movilidad de los sensores una vez que la localización a observar ha sido decidida por el método de muestreo. La perspectiva tradicional en ciencias de la computación sobre restricciones a la movilidad busca principalmente la auto-protección del sensor, en lugar de la protección de los seres humanos y de los recursos naturales. En cambio, en el ámbito de la observación medio ambiental, los sensores móviles primordialmente deben mejorar la monitorización, incluso cuando dicha movilidad podría producir efectos negativos sobre la cobertura espacial, la conectividad o el consumo de energía. Por ello, las restricciones a la movilidad son útiles para reducir esos efectos negativos pero sin llegar a restringir el método de muestreo en sí mismo. Aunque las redes de sensores son actualmente una tecnología madura, su uso aún no está generalizado entre los expertos en geo-información y medio ambiente. El uso operativo de estas redes de sensores en las ciencias de la geo-información y del medio ambiente necesita, por lo tanto, ser promovido. Esta tesis se centra en las redes inalámbricas de sensores, no obstante otros tipos de redes de sensores informales también podrían ser relevantes para la monitorización medio ambiental, tales como teléfonos inteligentes, ciudadanía voluntaria y web de sensores. Por último, las siguientes recomendaciones son dadas para futuras investigaciones: extender el método de muestreo de fenómenos dinámicos para contemplar las restricciones a la movilidad; desarrollar métodos de muestreo siguiendo un enfoque descentralizado; focalizar en las restricciones a la movilidad relacionadas con la transmisión de datos y la conectividad; llevar a cabo estudios para revelar preferencias sobre la movilidad restringida de sensores en diferentes tipos de aplicaciones medio ambientales; y validar los enfoques propuestos en aplicaciones operativas.