

Geosimulaciones: cuando un SIG no es suficiente

Ander Pijoan⁽¹⁾, Oihane Kamara-Esteban⁽¹⁾, Cruz E. Borges⁽¹⁾,
Iraia Oribe-Garcia⁽¹⁾, Cristina Martin⁽¹⁾, Ainhoa Alonso-Vicario⁽¹⁾

- (1) Deusto Institute of Technology - DeustoTech Energy, Universidad de Deusto, Avda. Universidades 24, 48007, Bilbao, Euskadi, España. {ander.pijoan,oihane.esteban,cruz.borges,iraia.oribe,cristina.andonegui,ainhoa.alonso}@deusto.es

Resumen

Imaginemos la necesidad de cuantificar la facilidad de acceso de la población a una infraestructura pública. Una posible solución es calcular la distancia a pie y analizar qué porcentaje de la población queda a menos de 300 metros. Sin embargo, esta solución no tendría en cuenta cuestiones como: la distribución por edades; la diversidad funcional; sus preferencias a la hora de transitar la ciudad; o la situación del tráfico. Es en estos casos cuando se hace necesario dar un paso más e integrar los SIG con sistemas que representen las características particulares de cada individuo y sus procesos de decisión como es el caso de los Sistemas Multi-Agente (SMA).

Los SMA se componen de entes inteligentes e independientes capaces de percibir su entorno e interactuar con él de manera racional emulando el comportamiento de una entidad. A esta integración de SIG y SMA se le conoce como geosimulación y permite desarrollar simulaciones mucho más certeras al modelar la realidad física junto con componentes sociales, demográficas, económicas, etc.

Además, conectando estas geosimulaciones al mundo real mediante sensores y actuadores, surge el concepto de *realidades mixtas*; simulaciones donde los cambios en el mundo real son trasladados al mundo virtual por medio de sensores y los agentes pueden influir en el mundo real mediante actuadores. Las realidades mixtas permiten desarrollar sistemas de control distribuidos, que no sólo tienen en cuenta la realidad física y las preferencias sociales sino también el estado actual, en los que desplegar agentes inteligentes que proporcionen servicios a la ciudadanía.

En este documento presentaremos tres ejemplos de geosimulaciones en los que estamos trabajando en la actualidad: la predicción del desarrollo urbano, estimación de la huella de carbono de tráfico en un territorio y optimización del servicio de recogida de basuras urbanas.

Palabras Clave: Geosimulaciones, Sistemas de Información Geográfica, Sistemas Multi-Agente, Simulaciones urbanas

Abstract

Imagine we need to quantify the ease of access of the population to public infrastructures. One possible solution is to calculate every distance and analyze which percentage of the population is in less than 300 meters. However, this solution does not take into account issues such as: the age distribution; functional diversity; people's preferences when transiting the city; or the traffic situation. It is in these cases when it is necessary to go a step further and integrate GIS with other perspectives such as Multi-Agent Systems (MAS) which represent the particular characteristics of each individual and their decision making processes. MAS are composed of intelligent and independent agents able to perceive their environment and interact with it in a rational manner emulating the behavior of a certain entity. This integration of GIS and SMA is known as geosimulation and builds more accurate simulations to model the physical reality together with social, demographic and economic components.

Furthermore, by connecting these geosimulations to the real world by sensors and actuators, the concept of mixed reality arises; simulations where changes in the real world are transferred to the virtual world through sensors and agents can influence the real world through actuators. Mixed realities allow developing distributed control systems, which not only take into account the physical reality and social preferences but also the state, where to deploy intelligent agents that provide services to citizens.

In this paper we present three examples of geosimulations we are working on today: the prediction of urban development, estimating the carbon footprint of traffic in a territory and service optimization for municipal waste collection.

Key words: Geosimulations, Geographic Information Systems, Multi Agent Systems, Urban simulations

1. Introducción

En una sociedad y territorio en constante evolución y cada vez más interrelacionados, hasta las acciones más pequeñas tienen repercusión en la dinámica de ambos. Es por ello, que los análisis y predicciones urbanas requieren cada vez de más nivel de detalle [3] y de tener en cuenta aquellos componentes que influyen en la dinámica urbana como son los factores sociales, demográficos o económicos. Si estos factores son ya complejos de comprender, aún son más difíciles de recrear dentro de un sistema informático. En este sentido, las simulaciones espaciales están sufriendo una gran transformación en los últimos años. Si bien en las décadas anteriores, los avances venían dados por la evolución de los sistemas de información geográfica, actualmente hay nuevas tecnologías que han entrado en juego en el modelado del urbanismo.

Uno de los términos que más protagonismo ha ganado recientemente es el de geosimulaciones. Éstas representan un nuevo concepto de modelo espacial que permite desarrollar simulaciones del desarrollo urbano a una escala sin precedentes. Reuniendo una gran diversidad de teorías y técnicas, las geosimulaciones ofrecen una perspectiva única no existente en los análisis espaciales tradicionales: una visión de los fenómenos urbanos como consecuencia de la dinámica colectiva de entidades que interactúan entre sí, a menudo representadas a escala de hogares individuales, personas u objetos cotidianos y en medidas de tiempo que se acercan al tiempo real. Para ello, éstas integran los SIG con Sistemas Multi-Agente (SMA) [17] o Autómatas Celulares (AC) [1] de forma que se pueda representar tanto la realidad geográfica como la realidad socio-económica de un territorio. De esta forma es posible aunar los componentes geográficos y sociales permitiendo conocer de antemano cuáles serán las necesidades de la ciudadanía en materias tan dispersas como el alumbrado, distribución de agua, recogida de basuras, centros educativos y de salud, zonas verdes, etc. sino también la optimización física y temporal.

2. Geosimulaciones

Los Sistemas Multi-Agente, son sistemas informáticos compuestos por agentes capaces de interactuar entre ellos. Cada agente inteligente comprende un programa independiente que emula un comportamiento pudiendo éste percibir su entorno, procesar percepciones y responder o actuar de manera racional al igual que haría la entidad que representa. Los agentes son ejecutados de forma paralela ya sea compitiendo entre ellos o cooperando para lograr un objetivo común. De esta forma, es posible crear redes de agentes trabajando conjuntamente para dar respuesta a problemas complejos que pueden estar más allá de las capacidades y conocimientos individuales de cada entidad.

Estos agentes se ejecutan y conviven en un entorno denominado ambiente. Tradicionalmente, el ambiente se consideraba simplemente como el contexto de despliegue donde los agentes se ejecutaban, el cual contenía la infraestructura básica de comunicación,

protocolos de interacción, la topología de red o incluso los recursos físicos disponibles. Sin embargo, desde hace unos años el ambiente ha sido reconocido como una entidad clave de primer nivel que al igual que los agentes debe ser independiente, inteligente y viva [16].

Dotar al ambiente de protagonismo e inteligencia permite agilizar y completar muchos de los análisis geográficos que hacemos con asiduidad. Las geosimulaciones se basan en la posibilidad de dividir el problema principal en subproblemas y asignar un agente a cada subproblema. Para ello, además, es necesario convertir a cada agente en espacialmente explícito, esto es, que además de estar representados por una geometría física, sean capaces de realizar operaciones espaciales en un entorno virtual.

Todo este proceso requiere invertir el flujo de programación de los análisis tradicionales construyendo los modelos con un enfoque de abajo hacia arriba. El hecho de modelar en un primer lugar el comportamiento de las entidades individuales a analizar y construir después agregaciones lógicas sobre éstas aporta ventajas significativas frente a los modelos tradicionales:

Flexibilidad: El uso de geosimulaciones agiliza muchos de los procesos habituales en los análisis espaciales. Dada su naturaleza basada en agentes, una vez programada la lógica que debe seguir cada uno de ellos, es fácil añadir automáticamente más instancias que repliquen el proceso. Esto proporciona un marco natural para afinar la complejidad de los agentes: comportamiento, grado de racionalidad, capacidad de aprender y evolucionar, las reglas de interacciones, etc.

Control distribuido: A diferencia de los análisis espaciales tradicionales, las geosimulaciones son procesos distribuidos y concurrentes. Cada agente se ejecuta en un hilo propio de forma paralela a los demás, no pudiendo predecir el orden en el que van a actuar. En el mundo real no existe un control central encargado de decidir el orden en el que cada individuo debe realizar sus actividades, sino que cada uno actúa de manera independiente y son las decisiones en conjunto las que tienen efecto sobre el entorno. En definitiva, las geosimulaciones aportan las siguientes características en cuanto a la ejecución:

Concurrencia: Es necesario tener en cuenta que los agentes van a ejecutarse de forma paralela por lo que algunas secciones y críticas pueden requerir mecanismos de gestión de concurrencia.

Rendimiento: Continuando con la concurrencia, el separar los procesos en agentes permite que, en caso de aumentar el número de tareas, el tiempo necesario para la consecución de las mismas no aumente de forma lineal.

Indeterminismo: El orden de ejecución de los agentes es totalmente aleatorio por lo que, dependiendo del tipo de simulación a realizar, el resultado final puede tener ligeras variaciones.

Pensamiento espacial: Como ya se ha mencionado los agentes deben ser espacialmente explícitos. Esto implica dos conceptos, por un lado deben pasar a ser entidades situadas en un entorno bidimensional o tridimensional georeferenciado. Si bien años atrás había agentes que simplemente contenían internamente una variable x e y o el ambiente se dividía en celdas, ahora es necesario que el ambiente sitúe el agente, el cual deberá estar georreferenciado en todo momento de forma que se puedan realizar operaciones espaciales con su localización. Además, por otro lado los agentes también deben tener capacidades espaciales en sus procesos de decisión.

Objetos discretos: Los análisis construidos con un enfoque desde arriba hacia abajo, generalmente hacen uso de particiones espaciales ya sea en forma de celdas o por agrupaciones de elementos para los cuales se asume que todas las entidades contenidas en su interior son homogéneas. El hecho de programar las simulaciones modelando las entidades de abajo hacia arriba mediante agentes con sus particularidades, consigue resultados con un comportamiento más natural y cercano a la realidad.

Mayor programación: Este paradigma implica la programación y configuración individual de cada uno de los tipos diferentes de agentes que va a interactuar con el ambiente, ya sean personas, vehículos, edificios, alumbrado público, etc

Más precisa: Si bien la cantidad de líneas de código incrementa, la exhaustiva definición de las características principales de cada uno, así como el modelado del comportamiento y la interacción entre ellos permite un modelo más dinámico, natural y cercano a la realidad.

Entorno dinámico y en tiempo cuasi real: Otra de las grandes ventajas y posibilidades que aportan las geosimulaciones es el uso de los entornos dinámicos y medidas que se acercan al tiempo real. Si bien, tradicionalmente, se empleaban entornos estáticos que capturaban el estado de un territorio en un momento dado, la propia naturaleza de los sistemas de agentes, en donde estos nacen, descubren, viven y después mueren, permite crear entornos que evolucionan en el tiempo. Además, según como se desarrolle el entorno virtual, éste puede estar directamente conectado con el mundo real, de forma que los cambios en este último se vean reflejados en la simulación.

Ambiente: Siguiendo la bibliografía y la experiencia adquirida en análisis espaciales anteriores, hemos desarrollado una estructura ágil para el desarrollo de geosimulaciones de cualquier tipo de ámbito. En esta estructura, el ambiente se compone de las siguientes piezas:

Ambiente geográfico: Este representa la parte física del ambiente, es decir las leyes y restricciones que todo agente debe cumplir para estar localizado en un mundo virtual. Entre los elementos a contener pueden estar índices espaciales, motores de físicas, etc. para la gestión rápida de la localización o asegurar que el agente no incumple ninguna de las

restricciones del ambiente.

Ambiente social: Además de su localización, cada agente deberá tener un contexto social y comunicativo. Para ello, esta parte del ambiente se encarga de organizar los procesos de comunicación, pertenencia a organizaciones, roles y conocimiento de los agentes. Puede contener protocolos de comunicación, sistemas de privilegios, etc. a usar por los agentes en sus procesos sociales.

Agentes: Los agentes son entidades inteligentes que tienen un objetivo específico. Para llevar a cabo esta función se comunican con el entorno y otros agentes con el objetivo de recoger información acerca de la situación del ambiente. Con esta información y de acuerdo a su tipo y objetivo, el agente tomará las decisiones necesarias y actuará en consecuencia, incidiendo así sobre el ambiente y las decisiones de otros agentes.

Entidades pasivas: Las entidades pasivas son también agentes inteligentes. La diferencia es que estos agentes son estáticos, es decir, no actúan por sí mismos, sino que responden a los estímulos provenientes del entorno.

Skills o habilidades: El punto importante en nuestro enfoque de las geosimulaciones es el concepto de las habilidades. Estas son el grado de competencia que diferencia y faculta a los agentes para realizar tareas y añade una gran flexibilidad y agilidad a la hora de desarrollar nuevos escenarios. Las habilidades la manera que los agentes tienen de percibir o propagar acciones al ambiente u otras entidades. Todas las habilidades necesitan estar contenidas dentro de un contexto y encargarse de que ciertas restricciones se cumplan. El ambiente junto con las habilidades debe asegurar que las restricciones físicas y lógicas se cumplan y no puedan existir agentes en situaciones imposibles.

Siguiendo este enfoque y desarrollando una amplia batería de habilidades, se consigue construir y parametrizar agentes de forma sencilla y fiable para simular cualquier tipo de escenario. Fruto de este flujo de trabajo, a continuación se exponen tres casos de uso llevados a cabo mediante geosimulaciones.

3. Casos de uso

3.1. Predicción de la nueva demanda eléctrica

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrentan las empresas de distribución eléctrica es el crecimiento de la demanda de energía eléctrica. En las condiciones económicas actuales, esta problemática es más acuciante pues las empresas de distribución no están procediendo a renovar determinadas infraestructuras alargando su vida útil lo

máximo posible. En este contexto, las previsiones de demanda eléctrica a largo plazo son muy importantes para todos los actores del sector energético (proveedores de energía, operadores de sistemas de distribución, instituciones financieras y otros participantes en la generación de energía eléctrica, distribución y venta al por menor) con el fin de garantizar el suministro eléctrico. La predicción de demanda eléctrica a largo plazo implica aspectos sociales, económicos, políticos y cuestiones técnicas, a las que hay que sumar la escasa información y la dificultad para operar con los escasos datos existentes.

El crecimiento de demanda puede dividirse en dos componentes: crecimiento vertical, el cual hace referencia al aumento del consumo de los clientes ya conectados a la red, y crecimiento horizontal, refiriéndose éste a la aparición de nuevos clientes. El crecimiento de demanda horizontal está estrechamente vinculado a la evolución urbana y, de hecho, los principales modelos de predicción se derivan de los campos de la geografía y la sociología [7].

Con objetivo de predecir este crecimiento horizontal de la demanda eléctrica, se ha desarrollado una geosimulación capaz de simular la variación en la carga de los transformadores y subestaciones eléctricas situadas en cierta ciudad y a su vez emula el comportamiento, las evaluaciones y decisiones que los compradores toman a la hora de elegir un nuevo lugar para vivir. En ella se despliega un ambiente con datos geográficos de la ciudad, red eléctrica, infraestructuras relevante, zonas construibles y agentes representando los distintos tipos de compradores de inmuebles y sus preferencias.

3.1.1. Ambiente

Estos datos han permitido el diseño de la red eléctrica conociendo sus capacidades y conexiones entre elementos. Los datos geográficos como son zonas construibles, servicios básicos, edificios existentes, etc. se obtuvieron combinando los registros del catastro con información voluntaria de OpenStreetMap.

A pesar de que los datos espaciales únicamente representan el estado actual de la ciudad, los datos eléctricos de clientes sí que se encontraban geolocalizados y con fecha de registro. A partir de estos datos se ha construido un mapa histórico completo de la evolución de la ciudad determinando qué áreas fueron habitadas en que años. Para ello se ha asumido que un edificio ha sido construido justo cuando el primer suministro eléctrico ha sido dado de alta. Sin embargo, con estos datos no es posible garantizar la fecha en la que distintas zonas rurales fueron transformadas en urbanizables por leyes y planes de ordenación territorial a medida que la ciudad crecía.

3.1.2. Compradores

Los agentes inteligentes emulan las personas en busca de una nueva casa. Dado que cada persona tiene diferentes preferencias sobre la presencia de (o la distancia a) infraestructuras y servicios básicos, cada agente cuenta con un vector que describe

la importancia de cada infraestructura para el comprador (por ejemplo, zonas verdes, transportes públicos, hospitales, centros escolares, y similares). Por otra parte, los agentes tienen un límite de presupuesto individual y un grado de codicia dependiendo del cual consultarán un número mayor o menor de casas antes de decantarse por una. Además, hemos identificado tres principales grupos objetivo que comparten un patrón común en cuanto a preferencias: adultos mayores, familias con hijos y solteros.

Cuando los agentes se inician en el ambiente consultan diferentes edificios y comprueban su precio y su cercanía a infraestructuras. Una vez consultado el número de edificios que el agente estime, éste intentará seleccionar la vivienda que mejor satisfaga sus necesidades. En caso de que algún otro agente haya comprado ya esta vivienda, el agente intentará adquirir la siguiente mejor hasta que las viviendas restantes no alcancen el mínimo de calidad deseado. Debido a esto y, al igual que en la vida real, puede darse que un agente no consiga una parcela.

Finalmente, una vez se ha instalado el agente, se predice la demanda de energía que tendría este nuevo asentamiento. Para ello, el agente consulta el consumo medio de sus vecinos y edificios colindantes y hace una estimación en base a su tipo de persona.

3.1.3. Zonas urbanizables

Estos agentes inteligentes emulan los terrenos edificables donde se pueden construir nuevas viviendas según los datos catastrales. Las autoridades locales definen un servicio como accesible desde la vivienda si este se encuentra a 5 minutos a pie. Es decir, teniendo en cuenta que la velocidad de un peatón está en torno a 4 km h^{-1} , esta distancia se corresponde con 300 m. Por lo tanto, cada agente de zona urbanizable tiene la habilidad de percibir su entorno hasta 300 m. De este modo, estos agentes buscarán y calcularán la distancia en línea recta a los servicios básicos e infraestructuras.

Uno de los problemas encontrados cuando se trabaja con suelo urbanizable es que muchas de estas áreas se han dividido en parcelas más pequeñas mientras que otras comprenden un área rural en general. Las áreas ya recortadas dan pistas sobre el tipo de edificios que pueden contener pero sin esa información, es difícil determinar el tipo de construcción y el número de ciudadanos que pueden albergar. Así que, con el fin de superar este problema el agente calcula, utilizando una ventana espacial en movimiento [9], el tipo de construcción, viviendas y cuántas alturas se esperan construir de acuerdo a todos los edificios adyacentes dentro de los 300 m.

Por último, en base de la información cargada, cada parcela establece su precio por metro cuadrado y se conecta a su centro de transformación más cercano.

3.1.4. Subestaciones y transformadores

Tanto subestaciones como transformadores han sido modelados como entidades pasivas dado que su única función es recibir las demandas de energía de los nuevos

hogares. Ambos contienen una capacidad máxima, una potencia demandada y un factor de simultaneidad. Este último representa el hecho de que a pesar de que los clientes tengan una potencia teórica contratada no todos están haciendo uso del 100 % de ésta constantemente. Por ello, el factor de simultaneidad ajusta el consumo total teórico de los clientes a las condiciones realistas.

Al conectar un nuevo cliente a las subestaciones y transformadores, estos comprobarán si la nueva demanda añadida no supera su capacidad máxima tanto teóricamente como aplicando el factor de simultaneidad.

3.1.5. Edificios existentes

Estos son los edificios residenciales existentes en el ambiente y se representan mediante entidades pasivas para que los agentes de zonas urbanizables puedan consultar sus atributos. Cada edificio tiene su representación física, con la ubicación y alturas de la construcción, y la información eléctrica con la cantidad de clientes, el transformador al que se encuentran conectados y la cantidad de energía que demandan.

3.1.6. Resultados

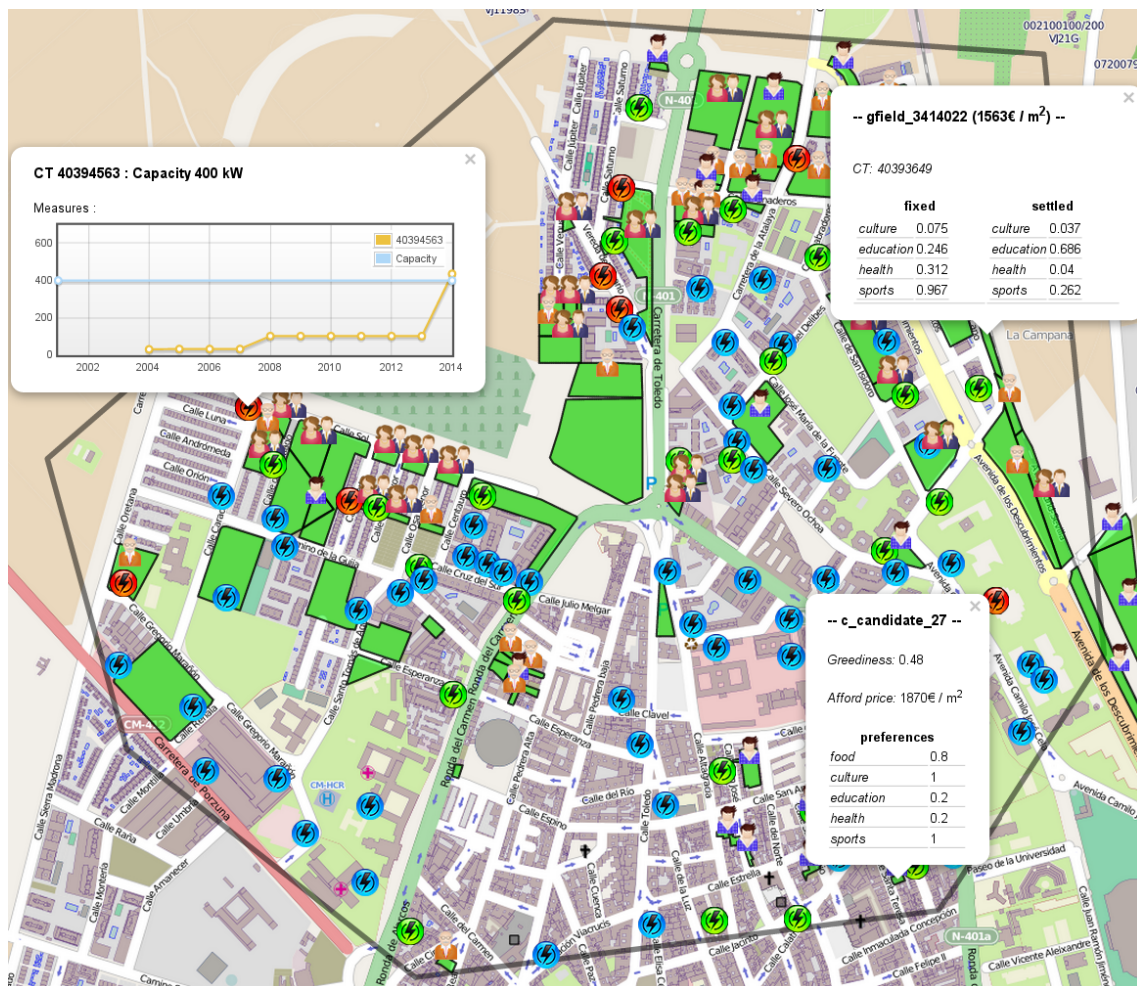
Usando esta metodología se ha simulado el desarrollo urbano de Ciudad Real, una ciudad de tamaño medio con cerca de 32 mil clientes que consumen energía y una superficie de 400 km², y los municipios de los alrededores, es decir, Miguelturra, Carrión de Calatrava y Poblete. La infraestructura eléctrica y mediciones de los clientes referentes al ambiente fueron proporcionados por la empresa distribuidora eléctrica. En [11, 2] se pueden observar los principales resultados.

3.2. Optimización de la localización de puntos de recogida de basura

La gestión de residuos urbanos engloba la generación, recolección y tratamiento de los residuos de las ciudades. Si bien estos procesos están relacionados entre sí, cada uno de ellos tiene singularidades que requieren un análisis independiente. Las autoridades competentes deben implementar estrategias que integren los procesos de recogida, tratamiento y eliminación, en busca de un equilibrio ambiental, legal y técnico, junto con la aceptación social y un coste adecuado. Uno de los problemas ambientales más importantes asociados con la recogida de residuos es el consumo de combustible durante la ruta de recolección. El uso de vehículos de combustible es, probablemente, la mayor carga ambiental de la gestión de residuos ya que representa entre un 50 % to 70 % del coste total de la gestión de residuos.

Las actividades de recolección varían significativamente dependiendo de la temporada, el día de la semana, el tipo de fracción y lo más importante la topología de la zona a recoger. De hecho, esta última variable (zonas urbanas, centros de ciudad, zonas rurales,

Figura 1: Geosimulación para la predicción del crecimiento de la demanda horizontal.



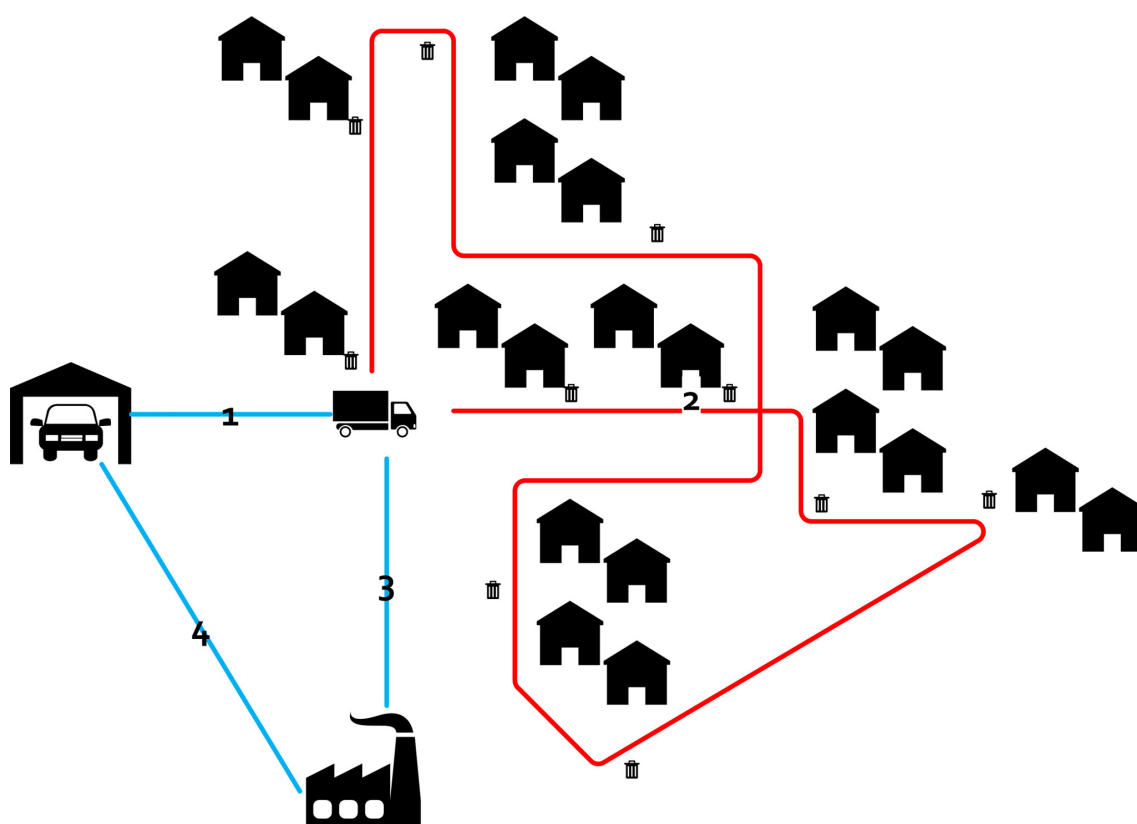
etc.), es la variable más importante en este proceso [10]. La recolección se puede dividir en 4 fases: salida hasta primer contenedor (1), ruta de recogida de contenedores (2), ruta hasta el centro de tratamiento (3) y retorno al punto de salida (4).

Tradicionalmente, la gestión de los residuos urbanos se ha hecho mediante contenedores para las siguientes fracciones: vidrio, papel y cartón, envases de plástico y la fracción resto. Las fracciones recogidas selectivamente se envían a plantas de reciclaje, mientras la fracción residual es gestionada bien mediante incineración energética o bien depositada en vertedero. En el caso a estudiar, la última fracción incluida al sistema de recogida selectiva es la fracción orgánica, donde principalmente dos han sido los sistemas implantados. Por un lado, algunos municipios han añadido un quinto contenedor para separar la fracción orgánica. Por otro lado, algunas localidades han optado por cambiar completamente el modelo por *uno puerta a puerta*. Su aplicación consiste en una recogida puerta a puerta de las fracciones materia orgánica, papel y cartón y envases de plástico y manteniendo la recogida en contenedores sólo el vidrio.

Para cuantificar este impacto de las distintas alternativas se ha desarrollado una meto-

dología basada en geosimulaciones que hace uso de información voluntaria, algoritmos de enrutamiento y el Handbook Emission Factors for Road Transport (HBEFA). En él se sitúan tanto los puntos de depósito de residuos como los centros de tratamiento y se calculan las distintas rutas que pueden seguir los camiones de recogida midiendo las emisiones (CO , CO_2 y NO_x) y consumo de combustible para las distintas etapas del proceso. Usando esta metodologías se ha comparado el impacto de varios sistemas de recogida.

Figura 2: Fases de recogida de residuos urbanos.



3.2.1. Handbook of Emission Factors for Road Transport

HBEFA es una herramienta que proporciona factores de emisión, es decir, la emisión específica en $\text{g p}^{-1} \text{ km}^{-1}$ para todas las categorías de vehículos actuales como automóviles, motocicletas o vehículos pesados y divididos en diferentes categorías. Publicado por primera vez en 1995, desde entonces añadiendo y actualizando datos de vehículos con medidas de Alemania, Austria, Suiza, Noruega y Suecia. Indicando variables como tipo de vehículo, longitud de un tramo de carretera, gradiente, velocidad y modo de conducción, el HBEFA permite conocer las emisiones y consumos de recorrer dicho tramo.

3.2.2. Ambiente

En este contexto, el ambiente sería la zona geográfica que comprenda tanto los municipios como la localización de las plantas de tratamiento pues estas pueden estar situadas muy alejadas de las poblaciones. Creando simulaciones separadas para cada municipio, en cada de ellas se crean los puntos de depósito siguiendo el sistema de recogida a analizar y se hacen circular camiones trazando la ruta óptima de recogida de esos puntos. A medida que estos se llenan o terminan la ruta, llevan los residuos a su respectivo centro de tratamiento.

3.2.3. Puntos de depósito

Estos, modelados como entidades pasivas, representan los contenedores o colgadores usados en el sistema puerta a puerta. Cada punto tiene un tipo de fracción que recoge y un límite de llenado. Generalmente en los sistemas tradicionales, los contenedores se intentan situar cerca de intersecciones entre calles. De esta forma se consigue por un lado que estos sean accesibles para un mayor número de vecinos y por otro facilitar que una vez recogidos el camión pueda tomar distintas direcciones y así las rutas sean más flexibles. Lógicamente en calles de gran largura también puede ser necesario situar contenedores en puntos intermedios de las mismas. En cambio, en los sistemas de recogida puerta a puerta los puntos de depósito se sitúan junto a las entradas de cada edificio de viviendas o en caso de ser calles inaccesibles o rurales en la intersección o punto más cercano por el que pueda circular el camión de recogida.

3.2.4. Habitantes

Dependiendo del escenario a analizar es posible crear agentes inteligentes que representen los habitantes del municipio. Uniendo datos publicados por la oficina estadística nacional o regional junto con los edificios mapeados en OpenStreetMap, se puede conocer agrupados por secciones y distritos la población existente así como en qué rango de edad se encuentran. Repartiendo estos datos entre los edificios existente en el distrito, la simulación permite desplegar agentes inteligentes que emulen la generación de residuos de los ciudadanos y los depositen en sus contenedores más cercanos.

3.2.5. Camión de recogida

Modelados como agentes inteligentes, los camiones de recogida pueden ser creados en cualquier momento de la simulación. Estos, se componen de un modelo de camión (de los existentes en el HBEFA), capacidad de llenado y velocidad máxima. A pesar de que los camiones de tienen ya la ruta fijada de antemano, en este caso se ha decidido que cada camión, al iniciarse, busque la ruta óptima para los puntos de depósito por los que debe circular. Para ello el camión consulta qué contenedores tienen un porcentaje concreto de

llenado y procede a calcular la ruta. La optimización de esta ruta requiere resolver una instancia del problema del viajante, esto es, ordenar los puntos de recogida de forma que se requiera la menor ruta para visitarlos. Este problema constituye un ejemplo clásico de problema NP-duro [8]. Actualmente pgRouting implementa una heurística para encontrar soluciones aproximadas basada en algoritmos evolutivos y la distancia euclídea que, sin embargo, no termina de funcionar correctamente en este ejemplo concreto. Es por ello que ha sido necesario implementar un algoritmo voraz iterando K-Dijkstra (distancia mínima de uno a muchos puntos) y seleccionando como siguiente punto a visitar el más cercano.

Tras calcular el orden en el que visitará los puntos de depósito, el camión emprende la primera fase de la recogida, es decir el trayecto desde el punto de salida hasta el primer depósito. Todo el recorrido, es contrastado con el HBEFA midiendo el impacto que supone. En esta fase la conducción se realiza sin paradas aplicando una conducción sin retenciones denominada *Free Flow*. Este es un punto importante ya que al comenzar la fase 2 (recogida punto a punto), la forma de conducción pasa a *Stop and Go*, la cual define una conducción con constantes paradas y aceleraciones. Las constantes paradas hace que el impacto generado se dispare en esta fase. Las fases siguientes hasta la planta de tratamiento y retorno, se vuelven a hacer bajo la conducción *Free Flow*.

3.2.6. Resultados

Usando este modelo se ha realizado la geosimulación de Sopela, un municipio de Bizkaia de en torno a 13000 habitantes. El principal resultado de esta geosimulación demuestra cómo los sistemas localizados más cercanos a los ciudadanos, tienen mayor capacidad de recogida selectiva pero, por lo general, consumen más recursos. Además no hay que olvidar la localización de los centros de tratamiento ya que el impacto generado por transportar los residuos a centros de tratamientos avanzados pero lejanos a la población en algunos casos es mayor que los beneficios que aporta el tratamiento. Una descripción detallada de esta geosimulación se puede encontrar en [12].

3.3. Cuantificación de la huella de carbono

Del total de gases de efecto invernadero producidos dentro de la Unión Europea (UE), la cuarta parte es responsabilidad directa del sector del transporte, por detrás de las industrias energéticas, las manufactureras y las de la construcción y otros procesos industriales. Esta categoría cubre cuatro modos de transporte: automotor, aéreo, ferroviario y transporte marítimo. De estos cuatro modos, el transporte automotor es considerado como el mayor emisor de gases de invernadero directo ya que contribuye por sí mismo a la quinta parte de las emisiones totales de CO₂ [13].

Con el objetivo de frenar estas emisiones, la UE ha puesto en marcha una serie de políticas que van desde la inclusión de directivas reguladoras en la construcción de vehículos nuevos así como el uso de carburantes con menos proporción de carbono, hasta

Figura 3: Fases de recogida de residuos urbanos.



la recomendación a las autoridades públicas a tener en cuenta el consumo de energía y los contaminantes producidos por los vehículos que necesitan contratar [15].

Dentro de este escenario, es importante también el despliegue de herramientas de apoyo a las decisiones que permitan a las administraciones públicas evaluar distintos escenarios parametrizables de acuerdo a las características del área geográfica que gobiernan. En este sentido, se ha desarrollado una geosimulación que permite identificar aquellas variables tanto de la infraestructura como del propio medio de transporte que más influyen en la generación de emisiones de CO₂ para tres tipos de vehículos en carretera: motocicletas, autobuses y coches.

3.3.1. Ambiente

Para esta geosimulación es necesario poseer un modelo bastante cercano a la realidad de las características geográficas y físicas de la red de carreteras. En particular es necesario:

- El patrón de movilidad diario de los ciudadanos junto con los tipos de vehículos que usan.
- La distribución de la red de carreteras junto con las características relativas a la velocidad máxima y al tipo (urbana, rural, autovía o autopista). Estos datos se puede obtener a partir de los datos distribuidos por OpenStreetMap.
- Datos de elevación del terreno. Estos datos se pueden obtener desde el Consorcio para Información Espacial (CGIAR-CSI) [6].
- Estimaciones de la emisiones de distintos tipos de vehículos. Igual que en el caso anterior, para el cálculo de las emisiones de CO₂ se tomó como referencia el HBEFA.

3.3.2. Vehículos

Los agentes inteligentes emulan personas que viajan, según su preferencia, en tres tipos de vehículos por carretera: motocicletas, autobuses y coches. En base a la distribución descrita anteriormente, cada persona calcula la ruta que debe seguir para llegar desde casa a su destino teniendo en cuenta el vehículo en el que viaja y el tipo de carreteras por las que puede circular.

Durante la simulación, cada agente realiza el trayecto por carretera recogiendo las características de la vía (tipo, gradiente, velocidad máxima y situación del tráfico). Una de las principales razones para el uso de las geosimulaciones en este caso de uso es que durante el trayecto pueden darse situaciones de congestión del tráfico en carreteras muy transitadas y otras incidencias que generan retenciones alterando el estado del tráfico. En base a estas características se realiza una consulta a la base de datos y obtiene las emisiones de CO₂ producidas en cada tramo. Las variables a consultar son agrupadas en conjuntos de dos, tres, cuatro y cinco variables para analizar la influencia de cada una en el cálculo de emisiones totales para cada vehículo.

3.3.3. Carreteras

Las carreteras son modeladas como un entorno pasivo ya que su función es la de dar información al vehículo acerca de características propias como el tipo de vía que es, la velocidad máxima a la que se puede circular por ella y el gradiente o elevación que tiene. Además, las carreteras tienen la habilidad de albergar y gestionar cuántos vehículos pueden circular paralelamente por su trazado.

3.3.4. Resultados

El área sobre el que se desarrolla la geosimulación comprende nueve de los municipios más poblados de la provincia de Bizkaia, en el País Vasco, en los cuales se detecta mayor movilidad de personas: Bilbao, Barakaldo, Getxo, Portugalete, Santurtzi, Leioa, Galdakao, Sestao y Durango. Estos datos de movilidad se han obtenido del censo de 2011 [5] llevado

de sensores, Internet de las Cosas, dispositivos portátiles inteligentes y, por supuesto, la información geográfica voluntaria ofrecen una nueva capa virtual donde el mundo físico es accesible e incluso modificable por cualquier sistema computacional. Esta capacidad de recopilación de información desde fuentes distribuidas está destinada a revolucionar la representación de los ambientes en los SMA.

Este es el punto de partida hacia una realidad mixta [14]. Estas se construyen sobre los ambientes ya mencionados y buscan mediante sensores y actuadores crear una representación virtual de un mundo real. Este ambiente converge a humanos y agentes de forma que los cambios en el mundo real son percibidos por sensores y trasladados al mundo virtual y viceversa. El desarrollando de realidades mixtas permitirá en un futuro la construcción de entornos virtuales donde desarrollar agentes inteligentes que proporcionen servicios a la ciudadanía y reflejen sus resultados en el mundo real. Sin embargo, estos sistemas requieren hacer frente a decisiones complejas para un entorno.

Mapear seres humanos del mundo real en el ambiente implica tener elementos que no se pueden controlar, modificar o incluso esperar que tengan un comportamiento racional. Aunque el entorno impone sus leyes sobre los agentes artificiales, no es posible cambiar el estado o los atributos de un ser humano. Por lo tanto, una de las principales preguntas es: ¿pueden los seres humanos saltarse las normas del ambiente? Es ahora, más que nunca, cuando se hace inevitable la necesidad de una entidad ambiente explícita que garantice la integridad y consistencia de todo el ecosistema.

Modelado humano del mundo real: Es necesario capturar los atributos humanos representativos del sistema y traducirlos en un agente o entidad del ambiente que se corresponde con la realidad. Estos atributos deben alinearse y estar armonizados con las capas donde los agentes artificiales ejercen sus funciones.

Infraestructura de comunicación: Los diferentes agentes inteligentes del ambiente deben ser capaces de reconocer las entidades humanas y tener mecanismos para comunicarse con ellos. De este modo, los agentes podrán percibir y obtener información de los seres humanos para sus procesos de toma de decisiones.

Limitaciones y leyes: El medio ambiente contendrá reglas que todas las entidades y agentes deben cumplir con el fin de definir tanto su existencia como el comportamiento con los demás. El ambiente y los agentes deberán saber cómo interactuar con los humanos y en casos de inconsistencias realizar la acción menos perjudicial para estos.

A medida que se vayan definiendo soluciones globales para la resolución de estos problemas, se conseguirá avanzar en análisis espaciales y desarrollar simulaciones de un territorio a una escala sin precedentes pudiendo además proporcionar servicios en tiempo real a la ciudadanía.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por los proyectos: a) GREEN_TRAVELLING (Era NET Transport 6/12/IN/2014/195) parcialmente financiado por *Diputación Foral de Bizkaia* a través de *Plan de Promoción de la Innovación* (6/12/IN/2014/195) y Gobierno Vasco a través de el programa GAITEK (IG-2014/0000133) b) Proyecto SEPARA financiado parcialmente por *Diputación Foral de Bizkaia* a través de BizkaiLAB. c) ITEA2 Nemo&Coded (CDTI-IDI-20110864-65) parcialmente financiado por el CDTI.

Referencias

- [1] Gavin Andrews y Adam Dobrin. «Cellular Automata and Applications». En: (2005).
- [2] C.E. Borges y col. «Multi-agent GIS System for Improved Spatial Load Forecasting». En: *Proceedings of the 2014 International Conference on Autonomous Agents and Multi-agent Systems. AAMAS '14*. Paris, France: International Foundation for Autonomous Agents y Multiagent Systems, 2014, págs. 1667-1668. ISBN: 978-1-4503-2738-1.
- [3] C.E. Borges y col. «Uso de fuentes de información geográfica voluntarias en proyectos de ingeniería.» En: *Actas de las vii Jornadas de SIG Libre, Girona 6–8 marzo, España*. Servicio de SIG y Teledetección - SIGTE - de la Universitat de Girona, 2013. isbn: 978-84-694-1624-2.
- [4] DeustoTech Energy. *GREEN-TRAVELLING: A platform to analyse and foster the use of Green Travelling Options*. url: <http://energia.deusto.es/projects/info/green-travelling/>.
- [5] Instituto Nacional de Estadística. *Censos de Población y Viviendas*. url: http://www.ine.es/prodyser/micro_censopv.htm.
- [6] Andy Jarvis y col. «Practical use of SRTM data in the tropics—comparisons with digital elevation models generated from cartographic data». En: *Working document* 198 (2004), pág. 32.
- [7] Rene Jordan, Mark Birkin y Andrew Evans. «Agent-based simulation modelling of housing choice and urban regeneration policy». En: *11th International Conference on Multi-Agent-Based Simulation*. 2010, págs. 152-166.
- [8] R. Karp. «Reducibility among combinatorial problems». En: *Complexity of Computer Computations*. Ed. por R. Miller y J. Thatcher. Plenum Press, 1972, págs. 85-103.
- [9] Joachim Kiesel y Karl-Otto Wenkel. «Spatial Generalization Methods Based on the Moving Window Approach and Their Applications on Landscape Analysis». En: *Shaker Verlag*. Ed. por Maciej Romaniuk (Eds.) Olgierd Hryniewicz Jan Studzinski. ISBN 978-3-8322-6397-3. Shaker Verlag, 2007, págs. 619-626.

- [10] Anna W Larsen y col. «Diesel consumption in waste collection and transport and its environmental significance.» En: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 27.7 (oct. de 2009), págs. 652-9. issn: 1399-3070. doi: 10.1177/0734242X08097636. url: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/19487314>.
- [11] A. Pijoan, O.K. Esteban y C.E. Borges. «Environment Modelling for Spatial Load Forecasting». En: *Environment for Multi Agents Systems*. Lecture Notes in Computer Science. 2015.
- [12] A Pijoan y col. «Quantifying the environmental impact of different methodologies for waste collection in Biscay». En: (submitted).
- [13] *Results of the review of the Community Strategy to reduce CO₂ emissions from passenger cars and light-commercial vehicles*. 2007.
- [14] A. Ricci y col. «Mixed environments for MAS: bringing the humans in the Loop». En: *Environment for Multi Agents Systems*. Lecture Notes in Computer Science. 2015.
- [15] Ian Skinner. «The Mitigation of Transport's CO₂ Emissions in the EU: Policy Successes and Challenges». En: *Forthcoming in Van Calster, G., Vandenberghe, W., and Reins, L.(eds), Research Handbook on Climate Mitigation Law, Cheltenham, Edward Elgar* (2014).
- [16] Danny Weyns, Andrea Omicini y James Odell. «Environment as a first class abstraction in multiagent systems». En: *Autonomous agents and multi-agent systems* 14.1 (2007), págs. 5-30.
- [17] Michael Wooldridge y Nicholas R. Jennings. «Intelligent Agents: Theory and Practice». En: *Knowledge Engineering Review* 10 (1995), págs. 115-152.