

E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de
Telecomunicación

Diseño y estudio radioeléctrico de un sistema de
comunicaciones inalámbricas basado en una red
de sensores Bluetooth y ZigBee para la
interconexión de semáforos



Máster de Comunicaciones

Trabajo Fin de Máster

Carlos Martínez Echeverría

Francisco Falcone

Pamplona, 25 de septiembre de 2015

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que creyeron en mi persona...

A esos otros que siempre están ahí...

A mis amigos, mi familia y especialmente a mi padre...

A todas las personas que me ayudaron en el desarrollo del proyecto...

Leire Azpilicueta.

Erik Aguirre.

Francisco Falcone.

¡Muchísimas gracias!

“El ánfora guarda siempre el aroma del primer vino que guardó”

RESUMEN

En los últimos años los sistemas de comunicación inalámbrica han experimentado un gran crecimiento, gracias principalmente a su facilidad de implementación y su bajo coste. Además, las mejoras en la tecnología han hecho posible el aumento de las velocidades de transmisión y la fiabilidad de estos sistemas hasta el punto de ser capaces de sustituir a los sistemas de comunicación cableados.

Por otro lado tecnologías como ZigBee o la versión 4.0 de Bluetooth son capaces de establecer comunicaciones entre dispositivos con un bajo consumo eléctrico, lo que permite que con una batería convencional la duración de ésta pueda ser superior al año.

Los sistemas inteligentes de transporte ITS están teniendo y van a tener cada vez una mayor importancia en las ciudades inteligentes, permitiendo un tráfico fluido y dinámico, con gestión de seguridad e infinitud de nuevas funcionalidades.

Es por ello, que la implementación de una red de sensores inalámbricos para la comunicación entre semáforos, semáforos y vehículos o semáforos y terminales móviles de las personas puede proporcionar grandes ventajas y ofrecer nuevos servicios tanto a peatones como a vehículos.

ABSTRACT

In recent years, wireless communication systems have experienced tremendous growth, thanks largely to its ease of implementation and low cost. In addition, improvements in technology have made possible the increase in transmission speeds and the reliability of these systems to the point of being able to replace wired communication systems.

On the other side, technologies such as ZigBee or Bluetooth 4.0 are able to establish communication between devices with low power consumption, which can make increase the battery life of these sensors until more than one year.

Intelligent transportation systems (ITS) are having and will have an increasing importance in intelligent cities, allowing a fluid and dynamic traffic, security management and infinity of new features.

This is why the implementation of a wireless sensor network for communication between traffic lights, traffic lights and moving vehicles or people terminals can provide great advantages and offer new services to both pedestrians and vehicles.

Contenido

1.	INTRODUCCIÓN	7
2.	OBJETIVOS	8
3.	STATE OF THE ART	9
3.1	SISTEMAS ITS	9
3.1.1	ITS mediante sensores	9
3.1.2	ITS mediante VANET	10
3.1.3	Algoritmos de gestión de tráfico	12
3.1.4	Comunicación entre semáforos	12
3.1.5	Otras comunicaciones con semáforos	13
3.2	INTRODUCCIÓN A REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS	13
3.3	WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS IEEE 802.15.....	16
4.	DESARROLLO DEL PROYECTO	31
4.1	Escenario a analizar	31
4.2	Ubicación de las antenas transmisoras y parámetros para la simulación.	40
4.2.1	Posicionamiento de las antenas transmisoras	40
4.2.2	Número de rebotes.	41
4.2.4	Tamaño de cubos.	41
4.2.3	Resolución angular.	42
4.2.4	Divergencia	42
4.3	Simulación	42
4.3.1	Descripción del escenario	42
4.3.2	Planos de potencia XY.	43
4.3.3	Planos de potencia XZ.	62
4.3.4	Delay Spread.	66
4.3.5	Valores de perfil Retardo de potencia.	71
4.3.6	Radiales de potencia.	80
4.3.7	Análisis de resultados.....	84
5	Conclusiones.....	86
6	Líneas futuras.	91
7	Referencias.....	92
7.1	BIBLIOGRAFÍA:	92
7.2	INDICE DE ILUSTRACIONES:	94
7.3	INDICE DE TABLAS:	96

8. Anexos	97
8.1 Planos de potencia XY a resolución de 1 metro.....	98

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el aumento del número de vehículos en circulación, y la tendencia de la ciudadanía a la agrupación en ciudades, ha provocado la congestión de carreteras y cruces, especialmente en ciudades con gran número de habitantes. Las infraestructuras existentes se han vuelto ineficientes para optimizar el tráfico, y el sistema tradicional de control de tráfico basado en semáforos con patrones preestablecidos en función de la fecha y hora no es eficiente a la hora de reducir tiempos de espera, consumo energético etc. De hecho, simulaciones realizadas demuestran que el tráfico adaptativo basado en información de sensores puede reducir en un 65% en condiciones de tráfico normales con respecto a la gestión de tráfico mediante patrones preestablecidos [1].

Por otro lado, el avance de las comunicaciones inalámbricas y la miniaturización de los componentes electrónicos han hecho posible que hoy en día este tipo de comunicaciones sean las más cómodas y con mayor auge para cualquier tipo de aplicación. El hecho de no necesitar cableado para su implementación, y la capacidad de comunicación en movimiento, junto a la disminución de los costes debido al avance de la tecnología han hecho que hoy en día sean uno de los sistemas más utilizados, como en radiodifusión, comunicaciones móviles o por satélite etc... El aspecto limitante de esta tecnología es el propio canal de comunicación, debido a posibles interferencias, condiciones climatológicas y dependencia con la morfología y materiales de los obstáculos, además del alcance que dependiendo de la velocidad de transmisión deseada puede no ser muy extenso.

Las redes WPAN se han convertido en una tecnología idónea para comunicaciones de corta distancia, y han centrado sus esfuerzos en el bajo consumo eléctrico, aspecto clave para la implementación de sistemas de comunicaciones con baterías y que no necesitan adoptar la infraestructura para su conexión a la red eléctrica, otro de los aspectos fundamentales.

Las redes de sensores inalámbricas, permiten un despliegue sencillo y poco costosa para la comunicación de semáforos, y en eso se basa el siguiente proyecto, en realizar una red de sensores Bluetooth y ZigBee para la interconexión de semáforos, realizando un estudio radioeléctrico para ver cómo afecta este entorno a una comunicación inalámbrica. Para ello, se realizará una simulación en una determinada zona de Pamplona, generando el escenario en 3D mediante Matlab, y colocando antenas transmisoras sobre los 16 semáforos de la zona a evaluar, para obtener un mapa de cobertura sobre el escenario completo.

2. OBJETIVOS

El objetivo del proyecto es el análisis del funcionamiento de un sistema inalámbrico (ZigBee y Bluetooth) en un entorno urbano con tráfico tanto peatonal como rodado. Para ello se tendrá en cuenta aspectos como la morfología y topología de los materiales, y será necesario estudiar el efecto del entorno, interferencia y posición de los transceptores.

En primer lugar se generará el escenario en 3D con todos los elementos presentes, edificios, bordillos, farolas, árboles, semáforos, hierbines, coches y peatones para posteriormente realizar simulaciones sobre trazado de rayos 3D deterministas.

Se realizará una simulación por cada uno de los 16 sensores transmisores, para posteriormente tener un mapa de cobertura global, y analizar la implantación en el entorno estudiado, de las tecnologías empleadas para esa comunicación, ZigBee o Bluetooth.

A partir de este estudio, y una vez vista la viabilidad de implementación, el sistema podrá ser empleado para compartir información en tiempo real de las condiciones de tráfico entre los diferentes semáforos y realizar un control de las luces de tráfico de forma dinámica, para realizar guiado de peatones por pasos de cebra, y cualquier aplicación que necesite una comunicación fluida entre semáforos y que se comentarán posteriormente.

3. STATE OF THE ART

3.1 SISTEMAS ITS

La directiva Europea 2010/40/EU del 7 de Julio de 2010 define los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) como tecnologías de comunicación aplicadas en el ámbito del transporte en carretera, incluyendo infraestructuras, vehículos y usuarios, que proveen información para la gestión del tráfico y la movilidad. Éstos ITS, se pueden clasificar en dos tipos, los que están basados en sensores que detectan el paso o la presencia de vehículos siendo los vehículos pasivos, es decir, el vehículo no tiene implementada ningún tipo de tecnología, y los sistemas basados en VANET o comunicaciones entre vehículos, ya sean comunicaciones entre vehículos o comunicaciones de vehículos con infraestructuras.



Ilustración 1: VANET

3.1.1 ITS mediante sensores

Desde los años 90, se han planteado infinitud de soluciones sobre ITS con el objetivo de mejorar y optimizar la gestión del tráfico. Los primeros sistemas ITS estaban basados en conteo de vehículos mediante sensores magnéticos, o mediante sistemas de visión artificial, sin embargo, estos sistemas no son capaces de identificar en todos los casos la identidad del vehículo, no son del todo fiables y necesitan visión directa para poder realizar su labor.

Los sensores magnetómetros, basados en la detección de campos magnéticos sobre los carriles de la carretera, se han utilizado para detectar la presencia y realizar el

conteo de vehículos. Estos sensores detectan el número de vehículos y su velocidad, enviando la información al Agente de Control de Intersección mediante módulos ZigBee [2, 3].

El conteo de esos vehículos puede realizarse mediante sensores NOD que detectan el paso de vehículo, y sensores OD que detectan el paso del vehículo y los vehículos parados junto a él. Y en cuanto a la arquitectura de esa red de sensores existen varias propuestas:

- Arquitectura con dos sensores para calcular el número de vehículos parados o llegando a la intersección en la que se ubica el semáforo, además, y puesto que un sensor está ubicado antes que otro, el segundo sensor sabe que llegará el vehículo en un tiempo determinado, con un margen de error, por lo que se podrá aplicar un algoritmo para calcular la secuencia de luces de los semáforos y la duración [4, 5].
- Arquitectura con varios sensores colocados en la carretera y separados 5-10 metros, comunicándose a saltos creando una red Ad-Hoc 802.15.4 IEEE [6].
- También se estudia la distribución en tipo matriz, cuando el tráfico es más caótico, para ello se colocan más sensores a medida que nos aproximamos a la intersección en la que se ubica el semáforo. Se minimiza el consumo de potencia apagando los sensores con el semáforo en rojo [7].

3.1.2 ITS mediante VANET

En los últimos años, y debido al avance de las comunicaciones inalámbricas, han aparecido nuevas posibilidades de gestionar el tráfico, basadas en comunicaciones vehiculares, con otros vehículos e infraestructuras, que facilitan y hacen más precisa la monitorización y la gestión de tráfico que con los mecanismos tradicionales de detección y conteo de vehículos.

Las comunicaciones entre vehículos o VANET (*Vehicular Ad-Hoc Network*), utilizan la tecnología DSRC (*Dedicated Short Range Communications*) o WAVE (*Wireless Access on Vehicular Environments*) para la comunicación entre los vehículos que serán los nodos de la red.

La mayoría de sistemas ITS basados en VANET realizan la comunicación de los vehículos con una infraestructura que será la que realice la gestión de tráfico en la intersección, aunque también hay sistemas con comunicación entre vehículos y que no necesitan semáforos para gestionar el tráfico.

- **Vehicle to Infrastructure**

Uno de los prototipos para la gestión de tráfico en redes de sensores inalámbricas (WITS) distingue tres tipos de nodos, *Vehicle Unit*, *Roadside Unit*, e *Intersection Unit*. El *Vehicle Unit* recibe información y la transmite a las *Roadside Units*, que almacenan la información de los vehículos de alrededor y la transfieren a la *Intersection Unit*, que será la encargada de enviar los datos a un sistema que calculará los ciclos y tiempos de los semáforos [8].

También basada en esta tecnología, vehículos equipados con un sistema de comunicación inalámbrico de corta distancia, se comunican entre ellos, transmitiendo periódicamente su posición determinada por GPS, ID, velocidad, dirección y estado, además del *timestamp*. El controlador escucha todas las informaciones de vehículos que se aproximan a la intersección para tomar decisiones [9].

La tecnología RFID también ha estado presente en este campo, y también hay estudios para la realización de un sistema dinámico de tráfico con RFID. Los vehículos disponen de un *tag* o etiqueta RFID activo, en la intersección existe un *Access Point WiFi* conectado a un servidor de localización. De tal forma que colocando varios sistemas de control inteligentes en una intersección, se obtiene información útil en los diferentes puntos de la carretera, que enviarán la información a un sistema de gestión de tráfico que calculará los ciclos en función del número de vehículos detectados en cada punto [10].

En cuanto a sistemas de monitorización de tráfico en tiempo real, basados comunicaciones V2X. Los vehículos *cluster* se comunican con la RSU enviando una matriz de información de posición, velocidad y resto de datos de sus vehículos vecinos. El vehículo más cercano en cada momento a la RSU es el *cluster head* y solo transmite él, su información y la de sus vecinos, utilizando la tecnología WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environment*), y con 802.11p tanto entre vehículos como entre el vehículo *cluster head* y la RSU [11].

En cuanto a la tecnología Bluetooth, existen modelos con sensores Bluetooth en la carretera para detectar ciclistas, y calcular el tiempo de ruta como el tiempo de detección del mismo dispositivo Bluetooth entre los dos sensores. Se define un ratio, y se combina con los *Induction Loops* para saber que efectivamente se trata de una bicicleta [12].

RFID también es una tecnología utilizada por los ITS. Lectores RFID colocados en la carretera detectan el paso de cada vehículo equipado con un *tag* RFID, analizando la congestión de la red y calculando la duración del cambio de luz de los semáforos. Cuando vehículos robados pasen por un lector, al estar en la base de datos el código de ese vehículo robado, el lector mandará ponerse rojo el semáforo y avisará a la policía mediante un módulo GSM. Las ambulancias equipadas con motas ZigBee, cuando estén en modo emergencia se comunicarán con el modulo para poner el semáforo en verde y poner en rojo el resto [13].

- **Vehicle to Vehicle**

Otros sistemas para la regulación de tráfico se han propuesto, como un sistema de semáforos virtuales (VTL) para *Vehicle Ad Hoc Networks* (VANET). Cuando llegan los coches a una intersección, uno de los vehículos es el leader, y trabaja temporalmente como si fuera un semáforo, creando y anunciando la regulación de tráfico. Cada vehículo envía su prisa, como un valor numérico, cuanto más alto mayor prioridad. Los vehículos que no tengan VTL, verán en el parabrisas del leader la regulación de tráfico como si se tratara de un semáforo [14].

3.1.3 Algoritmos de gestión de tráfico

Una vez realizada la recogida de datos por parte de los ITS, los sistemas como SCOOT desarrollado en el Reino Unido, y SCAT desarrollado en Australia, se encargan de realizar el algoritmo para determinar el ciclo de los semáforos, y tiempo de luces. Además, se han realizado mejoras de inteligencia computacional sobre esos algoritmos, dando lugar a “*GentigAlgorith*”, “*FuzzyLogic Control*”, “*Neural Network*”, “*Queueing Network*” etc.

Algoritmos basados en comunicación inalámbrica entre vehículos y *Road Side Units* tal y como especifica VANET, resultan más eficientes para realizar un control adaptativo de tráfico, ya que a diferencia de SCOOT y SCAT que basan sus cálculos en detección de vehículos, estos algoritmos adaptativos tienen en cuenta tanto la densidad de tráfico como la localización relativa de cada vehículo a la intersección (Kwatirayo, Almhana, & Liu, 2013), como podrían ser “*Maxium Intersection Utilization*” y “*Empty lane with Green Light*” [15] o basados en optimización por enjambre de partículas o “*Particle Swarm Optimization*” [16].

3.1.4 Comunicación entre semáforos

La conexión entre semáforos y controladores, puede realizarse mediante cableado de cobre, coaxial y fibra óptica, aunque también es posible la comunicación inalámbrica entre semáforos, que ahorraría la inversión a la hora de implementar una comunicación entre semáforos al no tener que realizar obras para introducir cableado. De hecho existen implementaciones utilizando PLCs conectados a cada semáforo, con módulos de comunicación ZigBee. Los PLCs de diferentes semáforos se comunican entre ellos y en función de la información del ITS deciden los tiempos del ciclo de luces y la secuenciación [17].

3.1.5 Otras comunicaciones con semáforos

Cuando en tráfico es caótico, o debido a un accidente o acontecimiento especial no sirve la regulación de los semáforos, los guardias de tráfico son los encargados de regular el tráfico. Existen sistemas que utilizan acelerómetros y giroscopios para detectar los movimientos gestuales del guardia de tráfico, y enviar esas órdenes a los semáforos mediante ZigBee y así poder controlar manualmente [18].

3.2 INTRODUCCIÓN A REDES DE SENSORES INALÁMBRICOS

Una red de sensores inalámbricos o del inglés *Wireless Sensor Network* (WSN), consiste en un conjunto de dispositivos de bajo coste y consumo denominados nodos, que son capaces de obtener información de su entorno, procesarla localmente y enviarla a través de enlaces inalámbricos hasta un nodo central de coordinación. Los nodos actúan como elementos de la infraestructura de comunicaciones al reenviar los mensajes transmitidos por nodos más lejanos hacia el centro de coordinación.

La red de sensores inalámbricos está formada por numerosos dispositivos distribuidos espacialmente denominados motas, que utilizan sensores para controlar diversas condiciones en distintos puntos, entre ellas la temperatura, la vibración, el sonido, la presión, el movimiento etc. Éstos sensores pueden ser fijos o móviles, y debido a su tamaño reducido y a su capacidad de transmitir sin cables permiten un rápido despliegue y flexible de centenares de dispositivos.

Las principales características de las WSN son la escalabilidad con respecto al número de nodos en la red, la auto-organización, la eficiencia energética, baja complejidad de la red, bajo coste y tamaño reducido de los nodos.

Las WSN tienen capacidad de restauración, por lo que si se avería un nodo, la red encontrará nuevas vías para encaminar los paquetes de datos, de esta forma la red sobrevivirá en su conjunto aunque haya nodos individuales que pierdan potencia o se destruyan. Las capacidades de auto-diagnóstico, auto-configuración, auto-organización y reparación son propiedades que se han desarrollado para este tipo de redes con el objetivo de solventar problemas que no eran posibles con otras tecnologías.

Elementos de una red de sensores:

Las redes de sensores se componen de diversos elementos todos ellos igual de importantes para el funcionamiento de la red inalámbrica:

- Sensores: se encargan de obtener información del medio ya sea temperatura, humedad, presión, detección de movimiento o cualquier otra información, para generar una señal eléctrica.
- Nodos sensores o procesadores de radio: obtienen los datos generados por los sensores y se encargan de transmitir la información a la estación base.
- Gateway: conjunto de elementos para la interconexión de la red de sensores y otra red de comunicación como TCP/IP.
- Estación base: coordinador de la red y recolector de datos basado en un ordenador común o sistema embebido.
- Red inalámbrica.

Composición de las motas

Las motas dotan de procesamiento y de comunicación al nodo sensor. Los procesadores de radio, toman los datos del sensor a través de sus puertas de datos y envían la información a la estación base. Los componentes típicos de las motas son:

- Baterías.
- CPU.
- Memoria Flash.
- Memoria separada para datos de programas.
- Placa de sensores en función de la aplicación (luz, humedad, presión...)
- Sistema radio para comunicar con otras motas.
- ADC: Conversor analógico-digital.

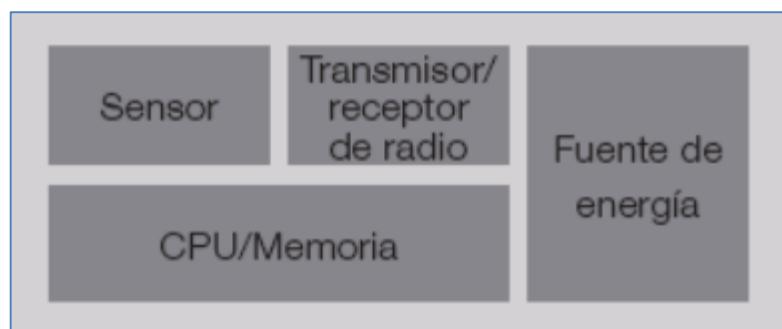


Ilustración 2: Componentes de las motas

Las motas son resistentes a la intemperie y terrenos inhóspitos y capaces de ejecutar una aplicación [19].

Aplicaciones

Entre las diversas aplicaciones que utilizan esta tecnología, vamos a destacar las siguientes clasificándolas en función del sector:

- Aplicaciones militares:
 - Monitorizar enemigos.
 - Reconocimiento del terreno.
 - Detección de ataques biológicos, químicos, nucleares etc.
- Aplicaciones medioambientales:
 - Seguimiento a animales.
 - Monitorización de las condiciones ambientales de cultivos.
 - Monitorización de un hábitat.
 - Riego.
 - Detección de incendios.
 - Detección de inundaciones.
 - Contaminación.
 - Prevención de desastres.
 - Estudios sísmicos.
 - Seguridad en infraestructuras.
 - Transporte.
- Aplicaciones médicas:
 - Tele-monitorización de datos de pacientes.
 - Diagnóstico.
 - Administración de medicamentos.
 - Seguimiento de médicos y pacientes en hospital.
- Aplicaciones en el hogar:
 - Domótica.
 - Control en electrodomésticos.
 - Control ambiental.
- Aplicaciones industriales:
 - Seguimiento de vehículos.
 - Control de flota.
 - Control de inventarios.
- Aplicaciones turísticas:
 - Interactividad en museos.
 - Control de accesos.

Actualmente el estándar más utilizado para las implementar estas seres redes WSN es el IEEE 802.15.4, basada en este estándar encontramos la tecnología ZigBee [20].

3.3 WIRELESS PERSONAL AREA NETWORKS IEEE 802.15

El estándar IEEE 802.15 se encarga de la estandarización e interoperabilidad de las redes inalámbricas de corto alcance o de área personal (*Wireless Personal Area Networks*, WPAN).

Es un grupo de trabajo dentro de IEE 802, centrado en la comunicación inalámbrica en distancias cortas, y que está compuesto de varios grupos de trabajo [21]:

- Task Group 1: WPAN/Bluetooth.
- Task Group 2: Coexistence.
- Task Group 3: WPAN High Rate.
- Task Group 4: WPAN Low Rate .
- Task Group 5: WPAN Mesh.
- Task Group 6: WBAN.
- Task Group 7: Optical Wireless Communications.
- Task Group 8: Peer Aware Communications.
- Task Group 9: Key Management Protocols.
- Task Group 10: Layer 2 Routing.

Entre las principales tecnologías basadas en el estándar 802.15 destacan ZigBee y Bluetooth.

3.3.1 ZigBee

La tecnología ZigBee es una tecnología abierta, global y con un protocolo basado en paquetes diseñado para proveer una arquitectura de fácil uso, segura, robusta y de poco consumo energético para redes inalámbricas. Se basa en la capa física y la capa de control de acceso al medio definida por el estándar IEEE 802.15.4, sin embargo introduce unas especificaciones para las capas superiores definidas por la ZigBee Alliance, que tiene como objetivo estandarizar las redes de corto alcance, baja tasa de transmisión, baja complejidad y bajo consumo energético.

Las características generales del estándar de comunicación IEEE 802.15.4, son:

- Velocidades de 250Kb/S, 40Kb/S y 20Kb/S.
- Direccionamiento corto con 16 bits y extendido con 64 bits.

- Detección de los niveles de energía recibidos (ED, *energy detection*).
- Garantía del manejo de las ranuras de tiempo (GTS)
- Indicadores de calidad en el enlace y conmutación de canales (LQI, *link quality indication*).
- Acceso al canal por CSMA-CA (CCA, *clear channel assessment*).

El estándar de comunicaciones IEEE 802.15.4 distingue dos tipos de dispositivos: dispositivo con todas las funciones (FFD, *Full Function Device*) y con funciones reducidas (RFD, *Reduced Function Device*) [22].

El estándar de ZigBee RF4CE mejora el propuesto por IEEE 80.15.4 proveyendo una única capa de red y perfiles estándar de aplicación que pueden utilizarse para crearse soluciones que interactúen entre ellas. Los principales ámbitos de utilización de ZigBee son:

- Automatización en el hogar y oficina.
- Automatización Industrial.
- Monitorización médica.
- Sensores de baja potencia.
- Control HVAC.
- Otros usos de control y monitorización.

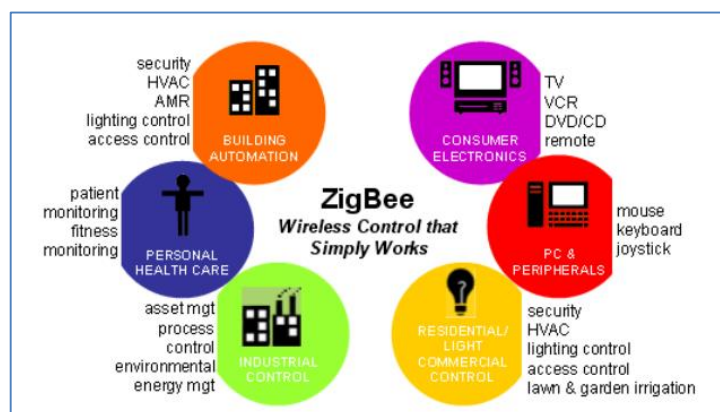


Ilustración 3: Aplicaciones de ZigBee.

Características de ZigBee:

ZigBee fue diseñado para convertirse en el estándar global de las redes de sensores inalámbricos, y sus principales características son las siguientes:

- Bajo consumo energético y fácil implementación.
- Baterías preparadas para el funcionamiento meses e incluso años.
- A diferencia de Bluetooth que dispone de varios modos de funcionamiento, ZigBee solamente tiene el modo activo o dormido.
- Bajo coste de instalación y mantenimiento.
- Alta densidad de nodos por red al basarse en la capa física y control de acceso al medio de IEEE 802.15.4.
- El código de la pila de protocolo es $\frac{1}{4}$ del utilizado en Bluetooth.
- Además de las bandas de Europa 868 MHz y América 915 MHz, la banda de 2.4 GHz ya está reconocida como una banda global reconocida en la mayoría de países.

Topologías de red:

La topología física soportada por IEEE 802.15.4 y las especificaciones ZigBee es una forma geométrica resultante de las uniones entre nodos. Soporta topología en estrella, y dos tipos de topologías peer to peer, en anillo o en árboles anidados.

Los dispositivos ZigBee son especificados como compatibles con topologías punto a punto y punto a multipunto.

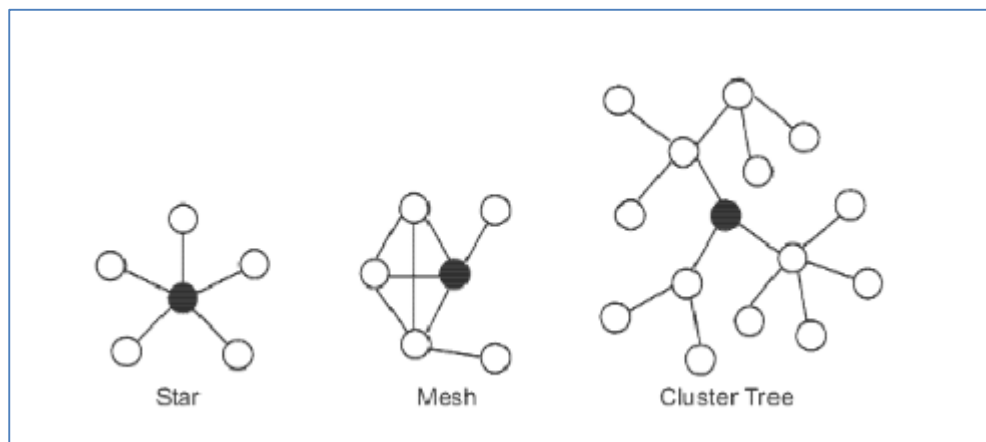


Ilustración 4: Topologías de ZigBee.

Dispositivos ZigBee y modos de operación:

En una red LR-WPAN existen dos tipos de dispositivos: *full function device* (FFD) y *reduced function device* (RFD).

El dispositivo de funcionalidad reducida (RFD) no tiene capacidad de enrutamiento, sólo puede ser configurado como un nodo final. Se comunica con su padre, que es el nodo que permite la unión del RFD con la red.

Sin embargo, el dispositivo de funcionalidad completa (FFD) tiene capacidad de enrutamiento y puede ser configurado como el coordinador de la PAN. En redes en estrella todos los nodos se comunican con el coordinador de la PAN, por lo que no importa si son dispositivos FFD o RFD. En una red peer-to-peer solamente hay también un coordinador de la PAN, pero existen otros FFDs que pueden comunicarse también con el resto de FFDs y RFDs.

Existen tres modos de operación soportados por 802.15.4:

- *PAN coordinator.*
- *Coordinator o router.*
- *End device.*

Los dispositivos de funcionalidad completa (FDD) pueden ser configurados para funcionar en cualquiera de los tres modos. En ZigBee la terminología de coordinador de PAN se refiere simplemente a un coordinador. En IEEE el término coordinador es el referido como *router* en ZigBee.

Funcionamiento de ZigBee:

Básicamente, ZigBee utiliza radios digitales para permitir a los dispositivos comunicarse con otros. Una red típica ZigBee consiste en varios tipos de dispositivos. El coordinador de la red es un dispositivo que crea la red, es consciente de todos los nodos dentro de la red, y administra tanto la información que alcanza cada nodo como la información que está siendo transmitida y recibida en la red. Cada red ZigBee debe contener un coordinador de la red. Otros dispositivos FFDs pueden encontrarse en la red, y soportarán todas las funciones definidas por 802.15.4, pueden actuar como coordinadores de la red, *routers* de la red o como dispositivos que simplemente interactúan con el mundo físico. El dispositivo final que se encuentra en estas redes es el RFD que normalmente solo se utiliza como un dispositivo que sólo interactúa con el exterior.

Tal y como se ha comentado previamente, existen varias topologías de red soportadas por ZigBee, la topología en estrella es la más utilizada cuando varios dispositivos se sitúan cercanos y pueden comunicar con un único nodo *router*, ese nodo puede ser parte de una red de anillo que puede comunicar con el coordinador de la red. La topología de red en anillo permite introducir redundancia en los enlaces, para que si uno de los nodos se cae, los dispositivos encuentren un camino alternativo y pueda seguir funcionando la red.

Pila de protocolos de ZigBee:

La especificación de ZigBee define la *Network Layer* y la *Application framework Layer*. La pila de ZigBee está basada en el modelo OSI de 7 capas:

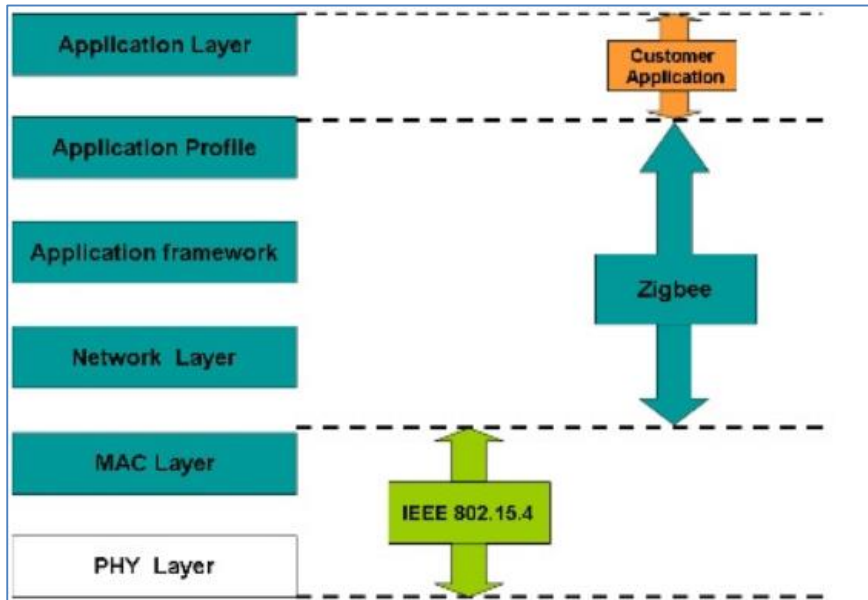


Ilustración 5: ZigBee en modelo OSI.

La capa de red asegura el correcto funcionamiento de la capa inferior MAC y provee un interfaz para la capa de aplicación. La capa de red soporta topologías en estrella, árbol y anillo, y entre otras cosas es la capa donde se crean las redes, se une a ellas, se deja la red y se descubren.

La capa de aplicación (APL) está creada de varias subcapas. Existen interfaces entre entidades de subcapas, denominados *Service Acces Points* (SAP).

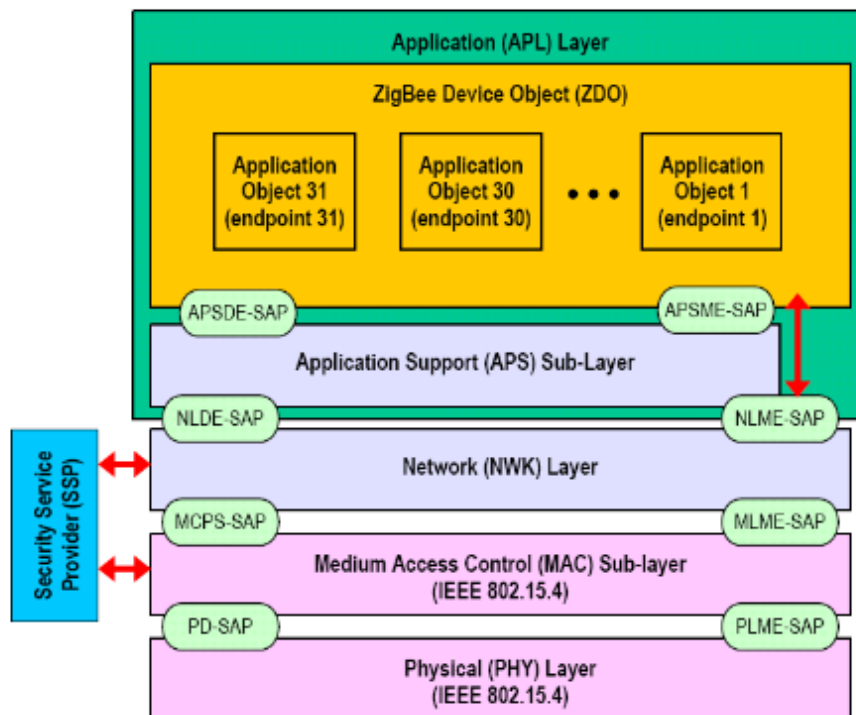


Ilustración 6: Capas y subcapas de la pila de protocolos en ZigBee.

Dentro de la capa de aplicación, encontramos las siguientes subcapas:

- *Application Support Sublayer (APS)*:
 - Se encarga de construir las tablas.
 - Reenvío de mensajes entre dispositivos cercanos.
 - Definición de las direcciones de grupo.
 - Mapeo de direcciones.
 - Fragmentación y reensamblado de paquetes.
 - Transporte fiable de datos.
- *Application Framework*: es un medio de ejecución para los objetos de aplicación para el envío y recepción de datos.
- *ZigBee Device Object (ZDO)*: es el responsable de la administración de los dispositivos:
 - Inicializa la subcapa APS y NWK.
 - Define el modo de operación del dispositivo (*coordinador, router o end device*).
 - Descubrimiento de dispositivos y determinación de los servicios asignados.
 - Inicialización y respuesta de peticiones.
 - Gestión de la seguridad.

- La capa física y de control de acceso al medio, tal y como se ha comentado están definidas por 802.15.4.

Empaquetamiento y direccionamiento:

En ZigBee, el empaquetamiento se realiza en cuatro tipos diferentes de paquetes básicos, los cuales son: datos, ACK, MAC y baliza.

El paquete de datos tiene una carga de datos de hasta 104 bytes. La trama está numerada para asegurar que todos los paquetes llegan a su destino. Un campo nos asegura que el paquete se ha recibido sin errores. Esta estructura aumenta la fiabilidad en condiciones complicadas de transmisión, cuando la relación señal ruido es baja.

La estructura de los paquetes ACK, llamada también paquete de reconocimiento, es dónde se realiza una realimentación desde el receptor al emisor, de esta manera se confirma que el paquete se ha recibido sin errores. Se puede incluir un tiempo de guarda o de silencio entre tramas, para enviar un pequeño paquete después de la transmisión de cada paquete.

El paquete MAC, se utiliza para el control remoto y la configuración de los nodos. Una red centralizada utiliza este tipo de paquetes para configurar la red a distancia.

El paquete baliza se encarga de “despertar” los dispositivos que “escuchan” y luego vuelven a “dormirse” si no reciben nada más. Estos paquetes son importantes para mantener todos los dispositivos y los nodos sincronizados, ahorrando batería sabiendo que solamente deben despertarse en los periodos de tiempo reservados para los *beacons*.

El direccionamiento es, a su vez, parte del nivel de aplicación. Un nodo está formado por un transceptor de radio compatible con el estándar 802.15.4 dónde se implementan dos mecanismos de acceso al canal y una o más descripciones de dispositivo (colecciones de atributos que pueden consultarse o asignarse, o se pueden monitorizar por medio de eventos). El transceptor es la base del direccionamiento, mientras que los dispositivos dentro de un nodo se identifican por medio de un *endpoint* numerado entre 1 y 240.

Los dispositivos se direccionan empleando 64-bits y un direccionamiento corto opcional de 16 bits. El campo de dirección incluido en MAC puede contener información de direccionamiento de ambos orígenes y destinos (necesarios para operar punto a punto). Este doble direccionamiento es usado para prevenir un fallo dentro de la red.

Los dos mecanismos de acceso al canal que se implementan en ZigBee corresponden para redes “con balizas” y “sin balizas”.

Para una red “sin balizas”, un estándar ALOHA CSMA-CA envía reconocimientos positivos para paquetes recibidos correctamente. En esta red, cada dispositivo es autónomo, pudiendo iniciar una conversación, en la cual los otros pueden interferir. A veces, puede ocurrir que el dispositivo destino puede no oír la petición, o que el canal esté ocupado. Este sistema se usa típicamente en los sistemas de seguridad, en

los cuales sus dispositivos (sensores, detectores de movimiento o de rotura de cristales), duermen prácticamente todo el tiempo. Para que se les tenga en cuenta, estos elementos se "despiertan" de forma regular para anunciar que siguen en la red. Cuando se produce un evento, el sensor "despierta" instantáneamente y transmite la alarma correspondiente. Es en ese momento cuando el coordinador de red, recibe el mensaje enviado por el sensor, y activa la alarma correspondiente. En este caso, el coordinador de red se alimenta de la red principal durante todo el tiempo.

En cambio, en una red "con balizas", se usa una estructura de supertrama para controlar el acceso al canal, esta supertrama es estudiada por el coordinador de red para transmitir "tramas baliza" cada ciertos intervalos (múltiples cada de 15.38 ms hasta cada 52 s). Esta estructura garantiza el ancho de banda dedicado y bajo consumo. Este modo es más recomendable cuando el coordinador de red trabaja con una batería. Los dispositivos que conforman la red, escuchan a dicho coordinador durante el "balizamiento" (envío de mensajes a todos los dispositivos, entre 0,015 y 252 segundos). Un dispositivo que quiera intervenir, lo primero que tendrá que hacer es registrarse para el coordinador, y es entonces cuando mira si hay mensajes para él. En el caso de que no haya mensajes, este dispositivo vuelve a "dormir", y se despierta de acuerdo a un horario que ha establecido previamente el coordinador. En cuanto el coordinador termina el "balizamiento", vuelve a "dormirse".

Otro aspecto muy importante es la seguridad de las transmisiones y de los datos, los cuales son puntos clave en la tecnología ZigBee que utiliza el modelo de seguridad de la subcapa MAC IEEE 802.15.4, la cual especifica 4 servicios de seguridad:

- Control de accesos, el dispositivo mantiene una lista de dispositivos "comprobados" en la red.
- Datos encriptados, las cuales utilizan una encriptación con un código de 128 bits.
- Integración de tramas, para proteger los datos de ser modificados por otros.
- Secuencias de refresco, para comprobar que las tramas no han sido reemplazadas por otras. El controlador de red comprueba estas tramas de refresco y su valor, para ver si son las esperadas [22, 23].

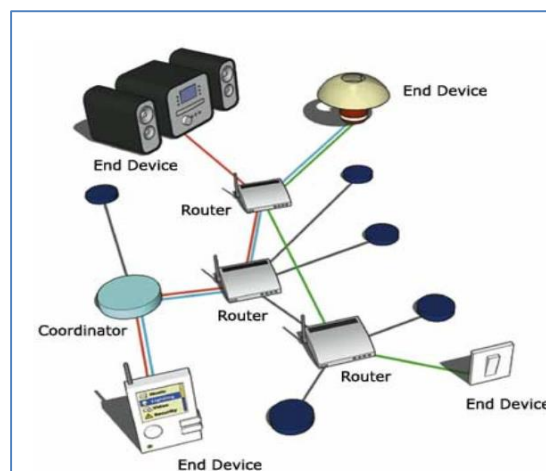


Ilustración 7: Ejemplo de red de sensores ZigBee.

3.3.2 Bluetooth

Introducción:

La tecnología Bluetooth es una especificación industrial que provee comunicación inalámbrica a corta distancia. Esta tecnología forma parte de las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN), y permite establecer una comunicación con cierto grado de seguridad entre un gran rango de equipos y servidores.

Está basada en el estándar 802.15.1 y en cuanto a la banda frecuencial, la tecnología Bluetooth opera en la banda no licenciada de 2,4 a 2,485 GHz, utilizada para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ISM) y disponible en la mayoría de los países. Utiliza espectro ensanchado, salto en frecuencia y comunicación full dúplex utilizando una frecuencia de salto de 1600 saltos por segundo.

El desarrollo de la tecnología fue realizado por Ericsson en 1994 como una alternativa inalámbrica a la comunicación serie 232 (utilizada en periféricos como impresoras, autómatas o routers y muy extendida en el entorno industrial). Para ello, un grupo de ingenieros de la empresa Suiza desarrolló la tecnología que posteriormente adaptaría el nombre de Bluetooth, en honor a un rey Danés del siglo X, llamado Harald Blåtand o en inglés Harold Bluetooth. Éste rey, fue capaz de unificar las regiones de Noruega, Suecia y Dinamarca, y al igual que el rey unificó los distintos territorios citados, Bluetooth trata de proveer conectividad entre diferentes tipos de dispositivos, productos e industrias.

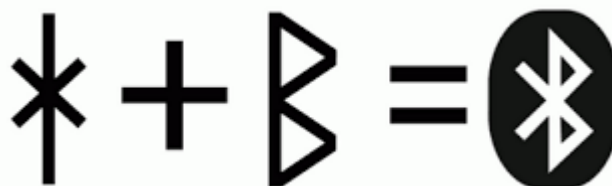


Ilustración 8: Origen del logo de Bluetooth.

En septiembre de 1998, las diversas compañías que adoptaron el sistema (Ericsson, Nokia, Intel, Toshiba e IBM) crearon el *Bluetooth Special Interest Group* (SIG), y posteriormente en 1999 3Com Corporation, Lucent Technologies, Microsoft Corporation y Motorola se unieron a la alianza. Ésta alianza, trabaja conjuntamente para el desarrollo de estándares y licencias de Bluetooth, y es propietaria de la marca. Las principales funciones del grupo son publicar especificaciones Bluetooth, proteger la marca, y promocionarla. Para que una compañía consiga una licencia de desarrollo de

Bluetooth, debe pertenecer al grupo Bluetooth SIG. Actualmente, la tecnología Bluetooth está soportada por más de 3000 compañías.

Ésta tecnología inalámbrica provee una forma sencilla para comunicar un amplio rango de dispositivos entre ellos e internet sin la necesidad de cables o conectores. Actualmente podemos encontrar en el mercado una gran variedad de productos con radio de corta distancia como impresoras, ordenadores, teclados, coches y por supuesto teléfonos móviles, que suponen el 60% de los equipos del mercado.

Los principales usos de la tecnología Bluetooth son la utilización de manos libres durante llamadas en teléfonos móviles, sincronización de aplicaciones entre PDAs, móviles y PCs, conexión de periféricos como impresoras, teclados, ratones inalámbricamente y la transferencia de ficheros como imágenes o música entre dispositivos móviles.

Han surgido diferentes estándares de Bluetooth desde su implantación. Tras la creación de las primeras versiones de la tecnología, en el año 2002 el grupo IEEE aprobó el estándar IEEE 802.15.1-2002 en lo que fue posteriormente denominado versión 1.1, posteriormente en noviembre de 2003 surgió una versión que proveía una conexión más rápida, coexistencia con WLAN, mejor QoS y compatibilidad con voz implementada en el estándar IEE 802.15.1-2005 (Versión 1.2). En Noviembre de 2004 surgió la versión 2.0+EDR capaz de proveer conexiones de hasta 2.18 Mbps, y en Julio de 2007 se actualizó a la 2.1. En el año 2009 se actualizó la versión a 3.0 con capacidades de transmisión de datos de 24 Mbps utilizando 802.11. Finalmente en junio de 2010 se realizó la última actualización a la versión 4.0, que incluye BLE y la principal característica es la optimización del consumo de energía.

Tipos de dispositivos Bluetooth [24]:

	Power	Range
Class 1	20 dBm	100 m
Class 2	0-4 dBm	10 m
Class 3	0 dBm	1 m

Ilustración 9: Clases de Bluetooth en función de la potencia transmitida.

Arquitectura y topología de la red:

Los dispositivos Bluetooth conectados entre ellos crean una red denominada *piconet*. Cada *piconet* soporta 8 dispositivos activos, y 10 *piconets* pueden coexistir en la misma área de cobertura y formar *scatternets*. En las *piconets*, hay un maestro que será

encargado de controlar la comunicación del resto de nodos de la red que serán esclavos, y solamente serán capaces de conectar con el maestro de la *piconet*.

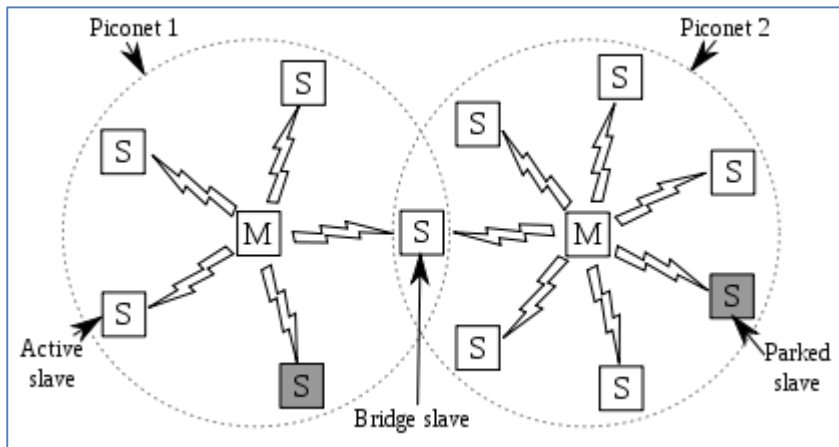


Ilustración 10: Piconets en Bluetooth.

Existen 3 modos de funcionamiento de los dispositivos dentro de la *piconet*: *sniff*, en espera o aparcado.

- Cuando el dispositivo está en modo “*sniff*” se reduce el ciclo de trabajo y el dispositivo Bluetooth pasa a escuchar cada M slots, una vez ha negociado el valor de M con el maestro de la *piconet*. Por lo tanto el maestro solamente puede transmitir con ese dispositivo en modo *sniff* en periodos específicos.
- Cuando un dispositivo se encuentra “*en espera*”, se apaga el receptor durante periodos de tiempo más largos con el fin de ahorrar energía, muy útil para redes de sensores inalámbricos. Cualquier equipo podrá establecer de nuevo un enlace con retardo medio de unos 4 segundos, gestionado por el gestor de enlace y el controlador de enlace.
- Si el dispositivo se encuentra en modo “*aparcado*”, el dispositivo despierta en intervalos regulares de tiempo para escuchar al canal y poder realizar una sincronización con el resto de equipos de la *piconet*. Esto es muy útil cuando no necesita participar activamente en el canal pero quiere permanecer sincronizado.

La seguridad en Bluetooth se implementa mediante autenticación, encriptación, control de calidad de servicio (QoS) y otras características, pero sin embargo, presenta vulnerabilidades en muchos aspectos, por lo que está amenazado por muchos posibles ataques tanto en la actualidad como en el futuro, que se analizarán en los siguientes capítulos.

Pila de protocolos:

A continuación se ofrece un gráfico con las diferentes capas que implementa Bluetooth y que explicaremos a continuación:

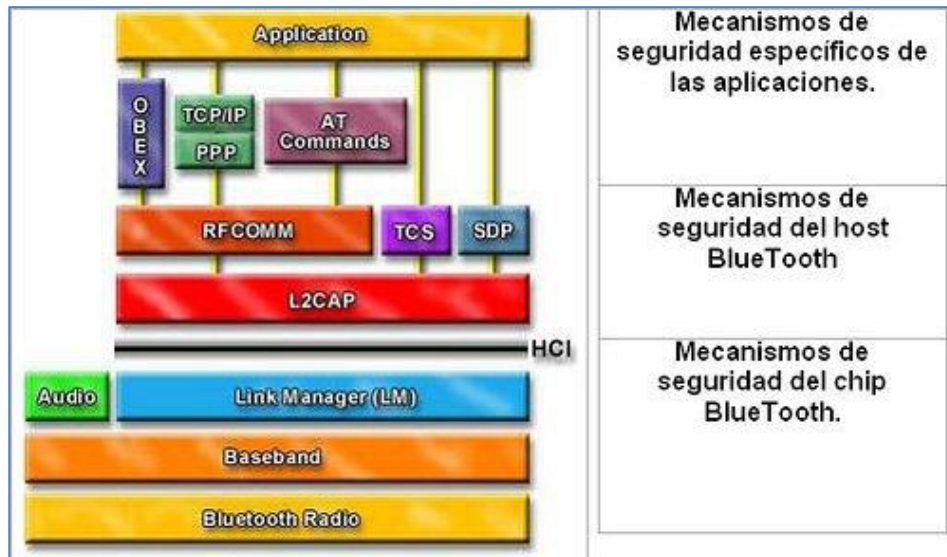


Ilustración 11: Pila de protocolos en Bluetooth.

Bluetooth Radio: es el protocolo que especifica las características del canal radio. Define la utilización en la banda ISM, centrada en 2,45 GHz, y es el nivel más bajo relacionado con el nivel físico. Define 79 canales de 1 MHz, de los cuales en España se utilizan solamente 23.

Baseband: es el protocolo análogo a lo que sería el nivel de enlace. Es responsable del establecimiento de la conexión dentro de la *piconet*, del direccionamiento empleado, del formato de los paquetes, la temporización y el control de potencia.

Link Manager (LM) y Link Manager Protocol (LMP): el Link Manager se encarga del establecimiento y gestión del canal, incluyendo aspectos de seguridad como autenticación o cifrado. Para ello utiliza el protocolo de gestión de enlace LMP, y utiliza los servicios incluidos en el controlador de enlace. El LMP se basa en PDUs que se intercambian los dispositivos. Entre los servicios soportados por el LM se encuentran los siguientes:

- Transmisión y recepción de datos.
- Petición de identidad o nombre. El LM identifica la identidad de un dispositivo utilizando nombres de 16 caracteres.
- Petición de las direcciones de enlace. El link Manager se encarga de buscar las direcciones a nivel de enlace (MAC) de los equipos.
- Establecimiento de la conexión entre dispositivos.
- Autenticación.

- Negociación del tipo de enlace dependiendo del uso que daremos al canal, en función si necesitamos voz/datos (aplicaciones de manos libres por ejemplo) o modo datos (transferencia de ficheros).

HCI o Interfaz de la Controladora de la Máquina: se encarga del descubrimiento automático de otros dispositivos que se encuentren dentro de la zona de cobertura (*inquiry*) siempre y cuando el equipo remoto esté configurado en modo visible. Ésta interfaz permite acceder al estado del hardware y registros de control de los equipos, y proporciona una capa de acceso común para todos los equipos Bluetooth en banda base. Existe un firmware de HCI presente en el equipo Bluetooth que permite la comunicación con la capa HCI del dispositivo. Para ello, se define la dirección identificativa única e inalterable del dispositivo Bluetooth (BD_ADDR), que se asociará al nombre del dispositivo, el cuál sí que puede ser modificado.

Logical Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP): es el protocolo encargado de adaptar los protocolos de la capa superior a la capa de banda base, y provee servicios orientados a conexión como no orientados a conexión. Se basa en el concepto de canales, siendo éste una conexión lógica sobre una conexión de banda base, que solo puede asociarse a un único protocolo de nivel superior. Así un paquete L2CAP recibido en un canal se redirige al protocolo superior correspondiente.

Service Discovery Protocol (SDP): demanda información y servicios de los dispositivos. Permite a las aplicaciones cliente descubrir la existencia de diversos servicios proporcionados por algún servidor de aplicaciones, junto a los atributos de éstos servicios. El servidor SDP mantiene una lista de registro de servicios con las características de éstos. Un cliente puede obtener información de un registro de servicio realizando una petición SDP.

RFCOMM: es el protocolo de transporte, que emula el comportamiento de un puerto serie 232 sobre el protocolo L2CAP. Permite hasta 60 conexiones simultáneas entre dos dispositivos Bluetooth. RFCOMM es útil para comunicar aplicaciones que utilizan puertos serie en los equipos que las ejecutan.

TCS BIN (Telephony Control Specification): protocolo que define la señalización para establecimiento de llamadas entre dispositivos Bluetooth.

OBEX (Object Exchange Protocol): ofrece una función similar al protocolo HTTP. Sirve para facilitar el intercambio de objetos binarios entre dispositivos. Es muy utilizado en transferencia de ficheros mediante infrarrojos. Sigue una arquitectura de cliente-servidor, donde un cliente OBEX obteniendo un número de canal RFCOMM mediante SDP, envía y solicita objetos de un servidor OBEX.

Seguridad en Bluetooth:

Uno de los principales retos del grupo SIG, fue dotar a la tecnología de una comunicación segura, por lo que centro los esfuerzos en crear una arquitectura de seguridad lo suficientemente robusta para ser fiable.

El estándar define por defecto tres modos de seguridad:

- **MODO 1:** No se implementa la seguridad. El dispositivo está en modo promiscuo y cualquier dispositivo Bluetooth será capaz de conectarse a éste sin necesidad de confirmación. Todos los mecanismos de seguridad, como la encriptación y autenticación están deshabilitados.
- **MODO 2:** Seguridad a nivel de servicio. Se implementa en la capa L2CAP. El funcionamiento es el siguiente: los procedimientos de seguridad se inician después de establecerse un canal entre el nivel LM y L2CAP. Existe un gestor de seguridad encargado de controlar el acceso a los servicios y dispositivos. Provee un interface muy simple, y no se utiliza ningún tipo de clave o PIN para conseguir la seguridad. Los accesos a las diferentes aplicaciones se pueden gestionar variando las políticas de seguridad y de confianza.
- **MODO 3:** Seguridad a nivel de enlace. Los procedimientos de seguridad son iniciados antes de establecer algún canal. Además del cifrado, utiliza autenticación mediante una clave (PIN) y seguridad MAC. Comparte una clave de enlace secreta entre los dispositivos, realizando un procedimiento de “pairing” al comunicarse los equipos por primera vez.

Autenticación y cifrado:

El proceso de autenticación en Bluetooth se realiza mediante el emparejamiento o “*pairing*”. Las funciones de seguridad a nivel de enlace, se basan en claves de enlace pseudoaleatorias de 128 bits, que se generan en los dos dispositivos una vez establecido el enlace entre éstos. Por lo tanto la autenticación se realiza a nivel de dispositivo y no de usuario.

Cuando dos dispositivos Bluetooth quieren comunicarse por primera vez, se utiliza el emparejamiento para crear una conexión segura entre estos. Para ello ambos usuarios deberán utilizar el mismo código PIN de 16 bytes, el que solicita la conexión introducirá un PIN, y el receptor deberá confirmar ese mismo código para que se genere la clave de enlace. Existen dispositivos que no permiten la introducción de códigos PIN (Manos libres, GPS...) que suelen adoptar un PIN establecido de fábrica por defecto, y por lo tanto muy sensibles a conexiones no deseadas.

En cuanto al cifrado de la información, permite proteger la información transmitida garantizando la confidencialidad en la comunicación. Es una herramienta de seguridad opcional, que debe ser aceptada por los dos extremos, determinando entre ellos el tamaño de la clave de cifrado, realizando una “discusión”. A veces no es posible

adoptar el mismo tamaño de clave en ambos equipos, por lo que Bluetooth indicará a los equipos que no es posible realizar un enlace cifrado.

Bluetooth establece en su especificación tres modos de cifrado diferentes:

- **MODO 1:** No se realiza cifrado.
- **MODO 2:** El tráfico dirigido individualmente se cifra mediante las claves individuales de cada conexión, pero el resto del tráfico va sin cifrar.
- **MODO 3:** Todo el tráfico se cifra mediante la Clave de Cifrado. [25, 26]

Analizando la siguiente gráfica podemos ver cómo la tecnología ZigBee puede trabajar en entornos con menor relación señal ruido que Bluetooth, debido a la capa física sobre la que se implementa (802.15.4) y a su baja velocidad que permite mayor BER [27].

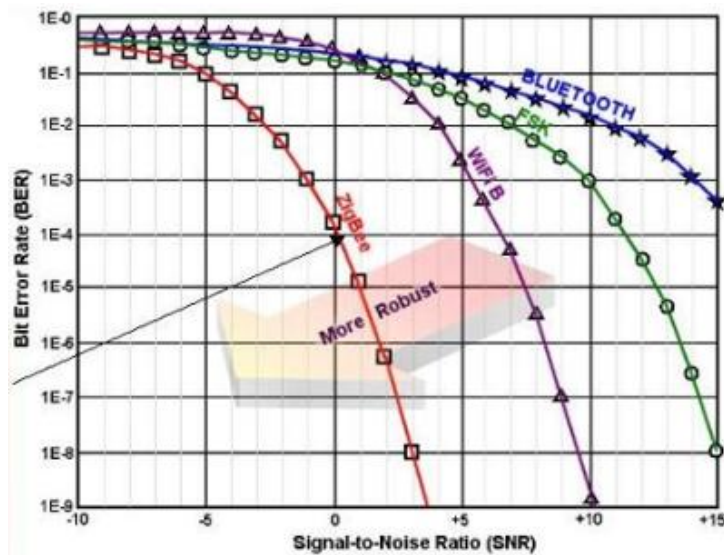


Ilustración 12: SNR Y BER en ZigBee y Bluetooth.

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1 ESCENARIO A ANALIZAR

El escenario a analizar se corresponde con una rotonda de la Avenida de Bayona en Pamplona. A continuación se ofrece una vista obtenida de Google Earth y la ubicación exacta del escenario:

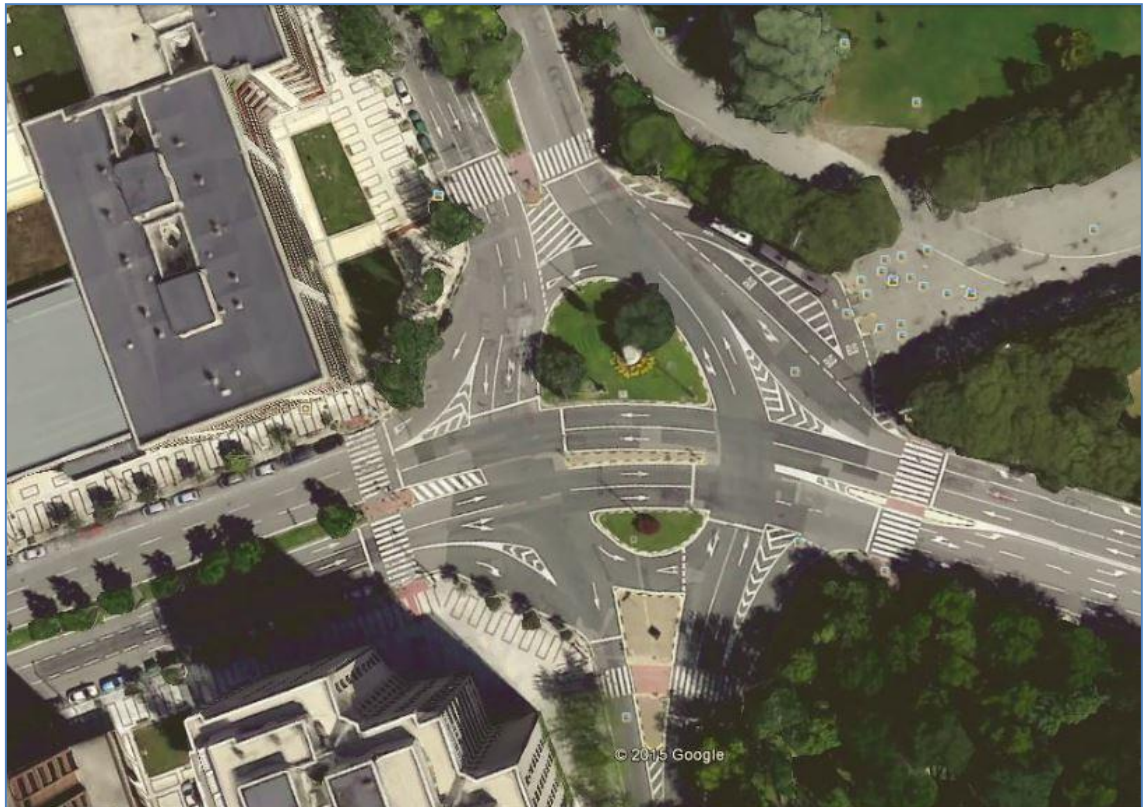


Ilustración 13: Vista satélite del escenario de simulación.

Dirección:	Avenida de Bayona (Pamplona).
Coordenadas:	42° 48' 54" N. 1° 39' 16" O.
Elevación:	441 metros.

Tabla 1: Ubicación del escenario de análisis.

Se ha decidido utilizar este escenario para el análisis al tratarse de un escenario complejo, que dispone en pocos metros de hasta 16 semáforos en donde colocaremos nuestros transmisores de radiofrecuencia para analizar la propagación en este entorno urbano.

Tal y como se puede apreciar en la imagen obtenida de Google Earth, se trata de un entorno urbano en el que la vegetación está presente, y podemos encontrar tanto zonas de asfalto, edificios y bordillos de las aceras cuyo material dominante es el hormigón, como zonas de vegetación, incluyendo hierbines, setos y árboles que tendrán también efecto en las propiedades del canal radio. Además el metal también será un material bastante presente en el escenario, debido a la presencia de farolas, semáforos y la carrocería de los coches.

Para incluir todos estos elementos y posteriormente analizar el escenario, se ha tomado un escenario de dimensiones considerables (150 metros x 130 metros, y 30 metros de altura) con el objetivo de cubrir toda la zona de la rotonda, los semáforos implicados tanto en el tráfico de peatones como de vehículos y sus inmediaciones, ya que todo objeto situado a cierta distancia de los transmisores ejercerá modificaciones en el campo radiado, ya sea por reflexión, difracción o scattering. En altura con los 30 metros que hemos reservado para el escenario nos aseguramos de que los edificios que aparecen en el escenario quedan completamente dentro del mismo.

Para la generación del escenario en cuestión, se ha tenido en cuenta la morfología del escenario, los materiales de éste, y los principales obstáculos que pueden encontrar las ondas. Por lo tanto, utilizando el software Matlab se han generado en primer lugar, los suelos, bordillos y hierbines del escenario, para posteriormente ir colocando los árboles, setos, farolas y semáforos existentes, además de los edificios presentes, estatuas etc. Se han generado semáforos y farolas de varias morfologías para asemejarlo lo máximo posible al escenario real y así obtener resultados más precisos, aunque el hecho de que el escenario haya que realizarlo con cubos es un hecho limitante para generar un escenario ideal.

Posteriormente se han introducido personas y coches en el escenario, colocándolas estratégicamente por las aceras y pasos de cebras, así como los coches circulando por los sentidos y zonas destinadas para ello.

A continuación se ofrece el gráfico generado por Matlab de los dos escenarios a analizar. Por un lado, un escenario sin peatones ni vehículos y por otro lado plagado con personas cruzando por pasos de cebra y por aceras y coches circulando por la carretera.

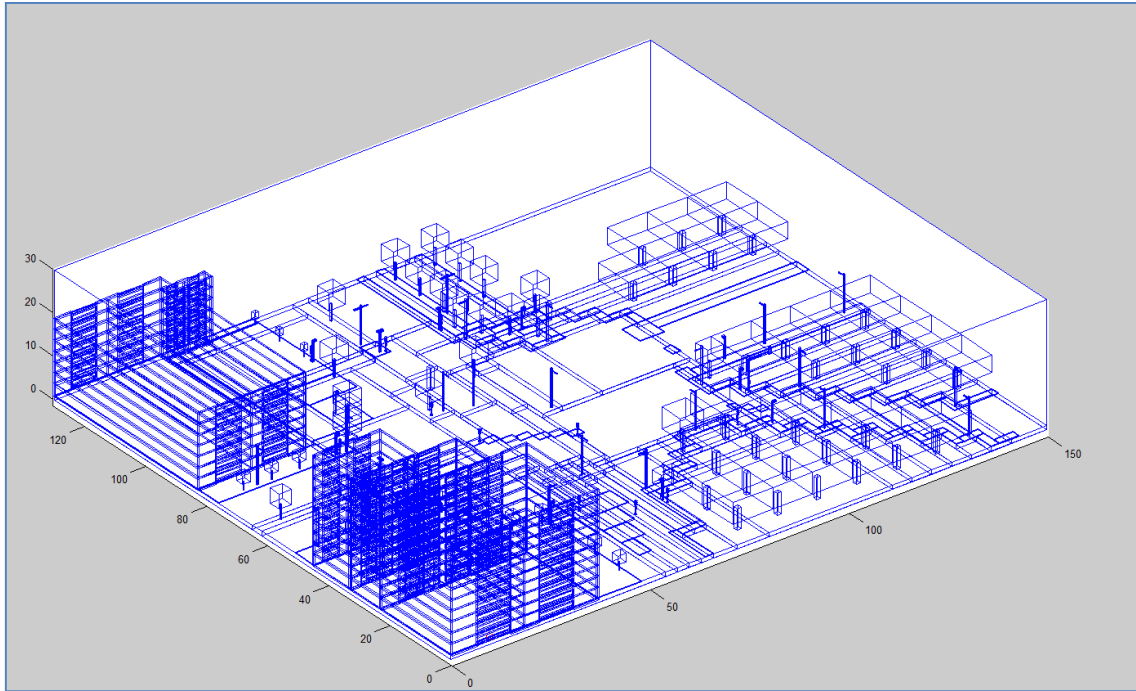


Ilustración 14: Escenario generado en Matlab sin tráfico.

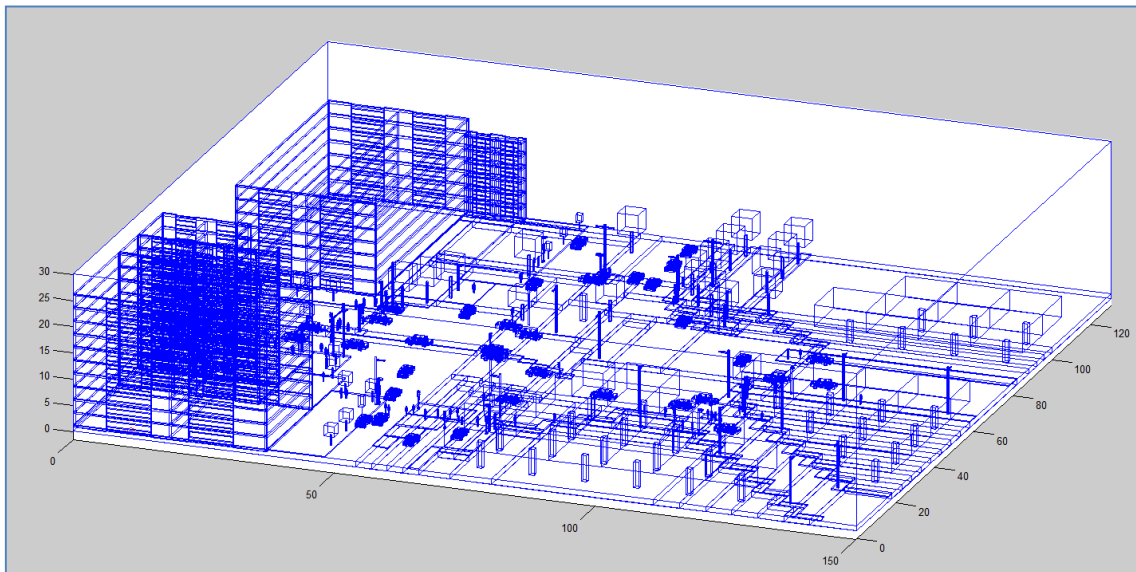


Ilustración 15: Escenario generado en Matlab con tráfico peatonal y vehicular.

En cuanto a la ubicación de los semáforos y a su identificación, como se ha comentado previamente se han introducido en el escenario los 16 semáforos existentes en la zona, para ello se han utilizado tres funciones en Matlab para la creación de tres tipos de semáforos: semáforo para peatones, semáforo para vehículos estándar, y semáforo para vehículos de gran altura. Por otro lado, se han generado también distintos tipos de farolas,

para asemejar lo máximo posible el escenario de la simulación al escenario real. A continuación se ofrece una figura con los obstáculos generados en Matlab:

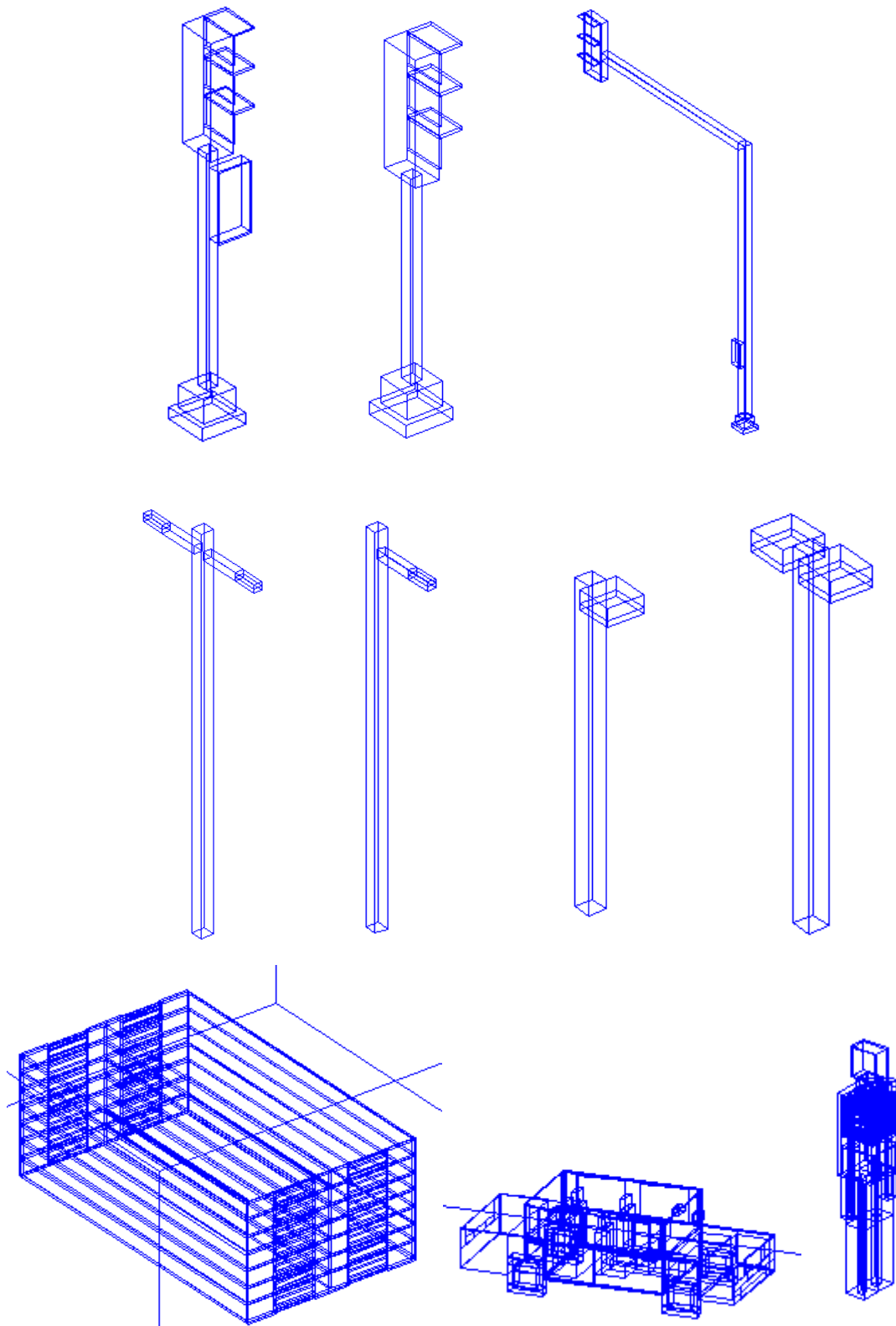


Ilustración 16: Obstáculos generados en Matlab para reproducir el escenario.

Cada obstáculo o elemento introducido en el escenario de simulación, está asociado a uno o varios materiales, que serán los responsables de reproducir el efecto de las ondas electromagnéticas cuando incidan sobre él. A continuación se ofrece una tabla con los elementos y materiales asociados a cada uno de ellos:

Elemento	Materiales
Suelo	Hormigón o hierba húmeda.
Aceras	Hormigón.
Edificios	Hormigón y cristal para ventanas.
Semáforos	Metal y polipropeno.
Farolas	Metal y polipropeno.
Coches	Caucho, metal, polipropeno, cristal,
Personas	Aorta, Vesícula, Sangre, Hueso (anular), Hueso ("cortical"), Hueso medula (infiltrado), Hueso medula (no infiltrado), Cerebro (Materia gris), Cerebro (Materia blanca), Grasa pecho, Cartílago, Cerebelo, Líquido cefalorraquídeo, Útero, Colon, Cornea, Tejidos oculares, Grasa (Media infiltrada), Grasa (Media no infiltrada), Vesícula biliar, Bilis vesícula biliar, Corazón, Riñón, Córtex ovular, Núcleo ocular, Hígado, Pulmones desinflados, Pulmones inflados, Musculo, Nervio, Ovario, Piel seca, Piel mojada, Intestino delgado, Bazo, Estomago.
Árboles	Madera tronco, follaje árboles

Tabla 2: Relación entre los elementos y materiales que los componen.

Material	Épsilon relativa	Conductividad
Aire	1	0
Cristal	6.06	0.11
Metal	$37.8 \cdot 10^6 / (2 \cdot \pi \cdot 2.4 \cdot 10^9 \cdot \epsilon_0 \cdot 4.6)$	$37.8 \cdot 10^6$
Hormigón	25	0.02
Polipropeno	3	0.11
Hierba húmeda	30	0.01
Madera tronco	1.4	0.021
Follaje árboles	$137 \cdot h^3 - 69.688 \cdot h^2 + 23.385 \cdot h + 1.4984$ (h=2)	$1.1541 \cdot h^3 - 0.5489 \cdot h^2 + 0.1669 \cdot h - 0.0004$;
Caucho	2.61	0

Tabla 3: Parámetros dieléctricos de los materiales.

A continuación se ofrecen las posiciones e identificación de los 16 semáforos del escenario:

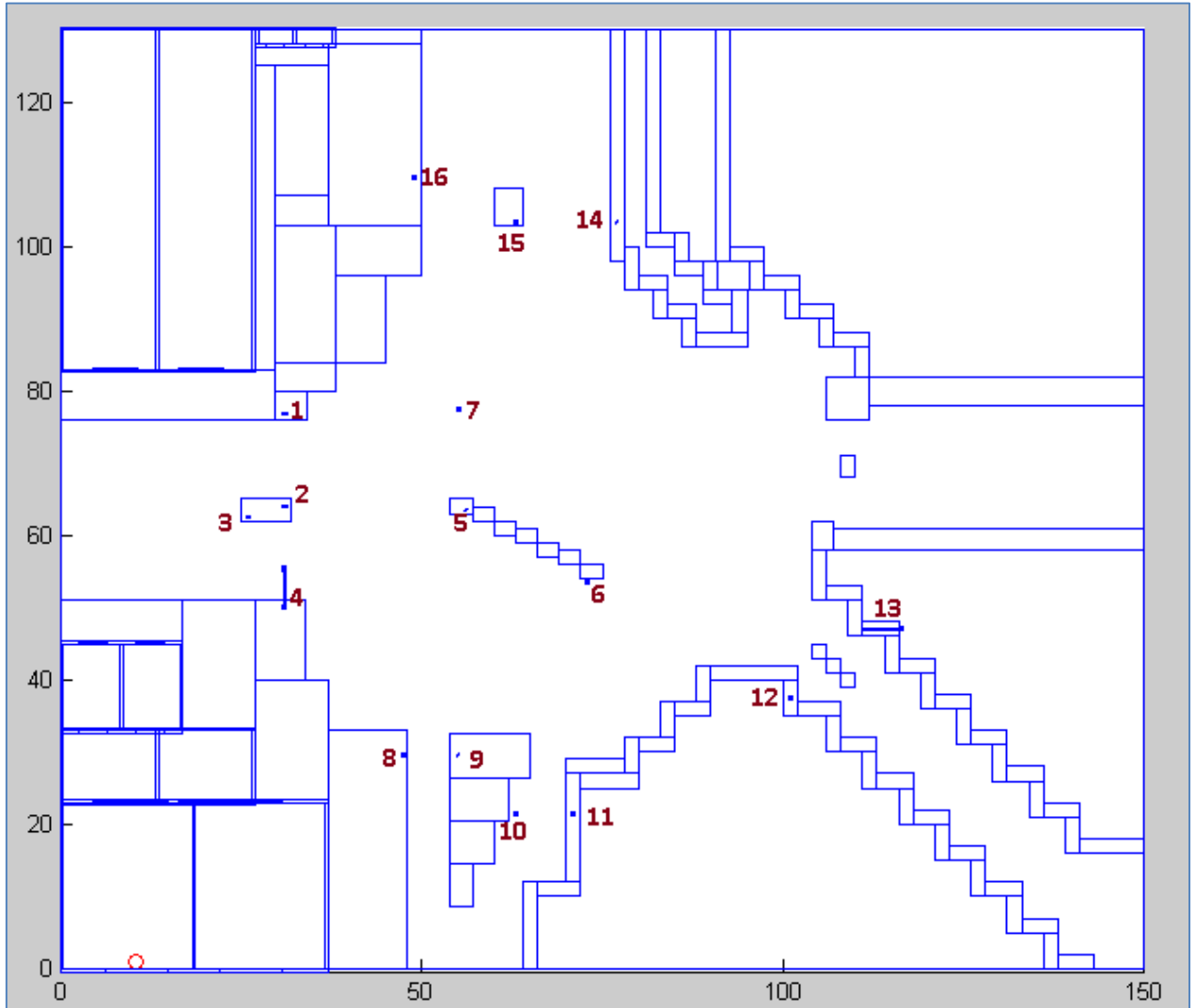


Ilustración 17: Ubicación e identificación de los semáforos.

En la siguiente tabla, se ofrecen las coordenadas, orientación y tipo de cada uno de los semáforos expuestos en la ilustración anterior:

Semáforo	Posición X	Posición Y	Posición Z	Orientación	Tipo
1	31	76.8	1.2	1	Peatón
2	31	64	1.2	1	Peatón
3	26	62.5	1.2	2	Peatón
4	31	50	1.2	1	Alto
5	56	63.5	1.2	1	Coche
6	73	53.5	1.2	2	Coche
7	55	78	1	1	Coche
8	47.5	29.5	1.2	3	Peatón
9	55	29.5	1.2	3	Peatón
10	63	21.5	1.2	4	Peatón
11	71	21.5	1.2	4	Peatón
12	101	37.5	1.2	3	Peatón
13	111	47	1.2	4	Alto
14	77	103,5	1.2	4	Peatón
15	63	103,5	1.2	4	Peatón
16	49	109,5	1.2	3	Peatón

Tabla 4: Posición, orientación y tipo de semáforos.

Una vez generado el escenario completo en Matlab, se ha generado en Blender con el objetivo de obtener imágenes renderizadas en 3D con mayor sensación de realismo del escenario. A continuación podemos ver varias vistas generales del escenario, y alguna vista más cercana que permite visualizar mejor la morfología de los objetos utilizados en la simulación.

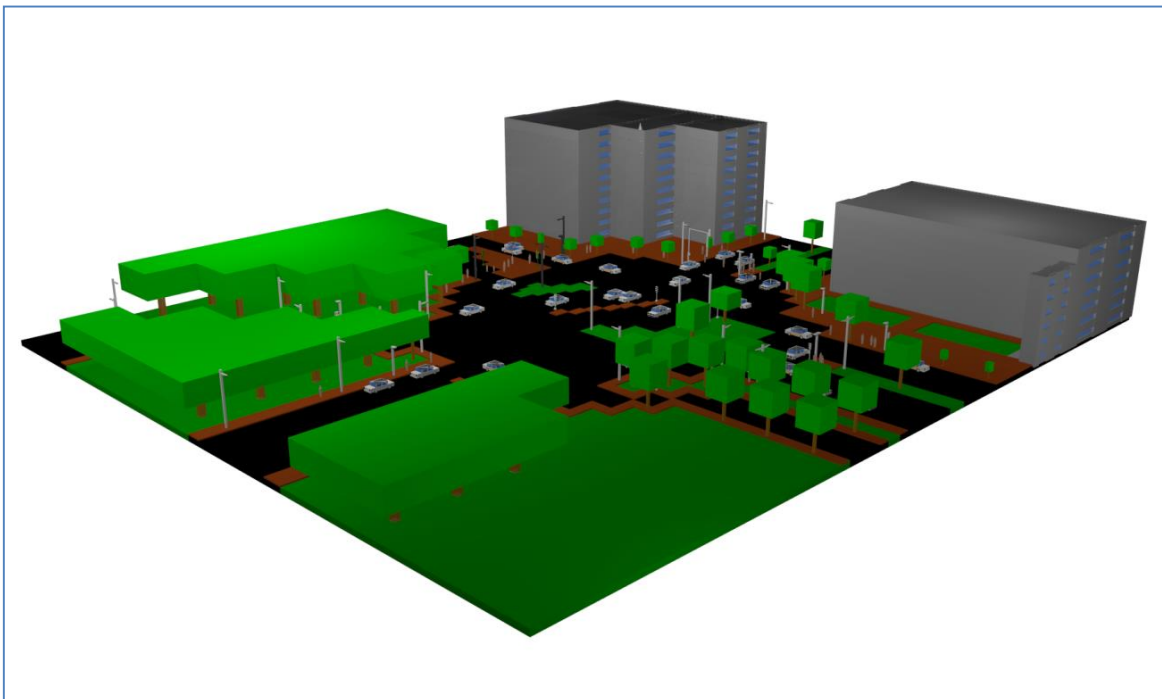


Ilustración 18: Vista general 1 del escenario en Blender.

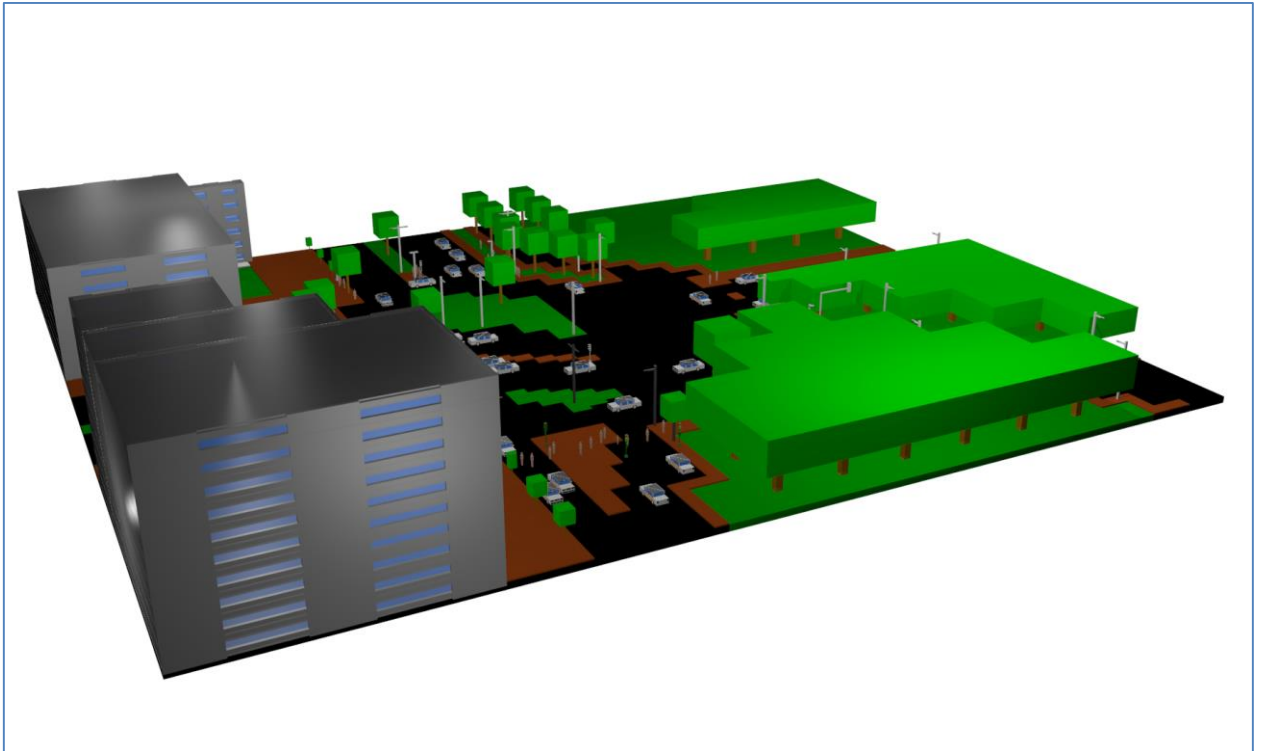


Ilustración 19: Vista general 2 del escenario en Blender.

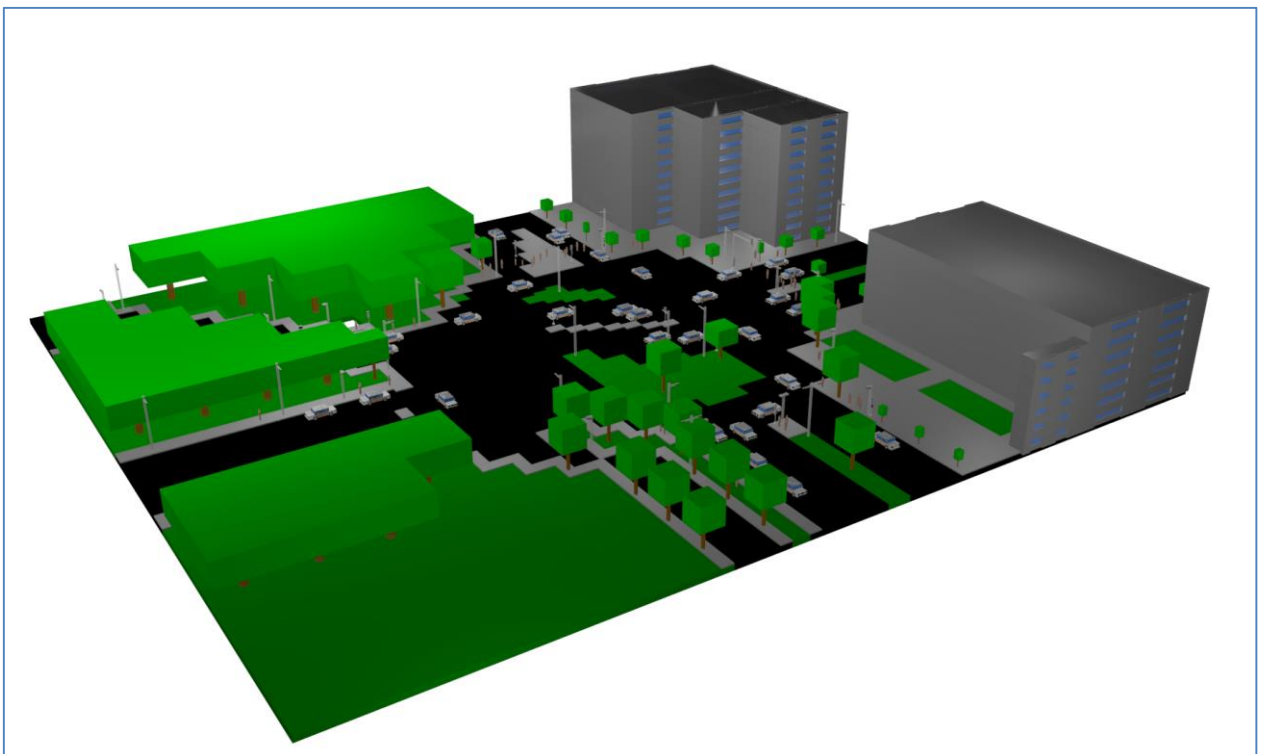


Ilustración 20: Vista general 3 del escenario en Blender.

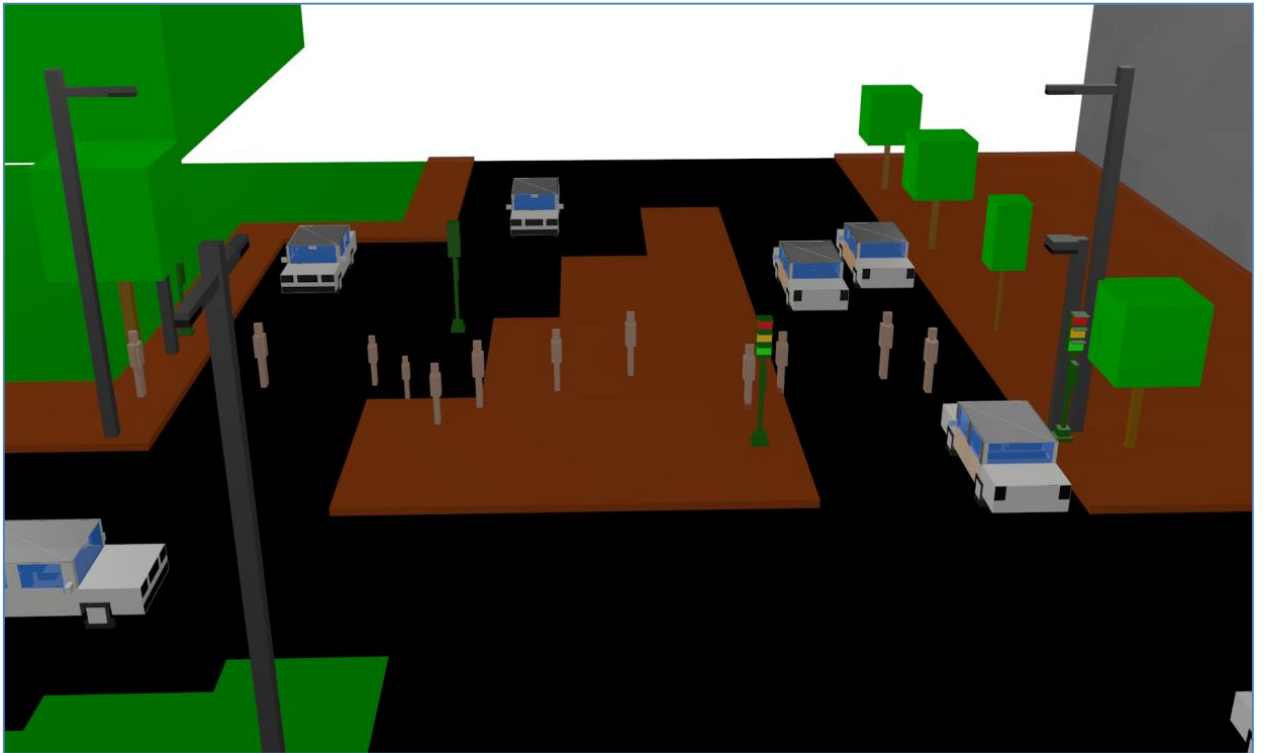


Ilustración 21: Vista ampliada 1 del escenario en Blender.

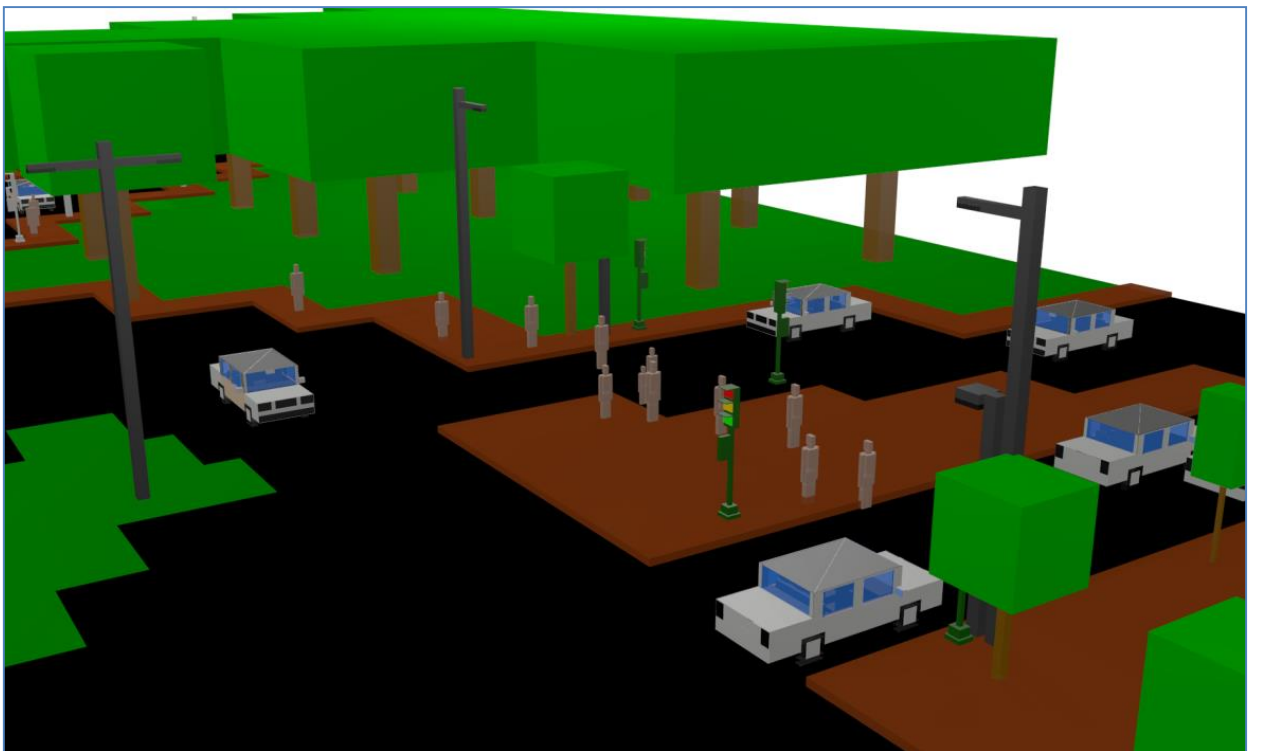


Ilustración 22: Vista ampliada 2 del escenario en Blender.

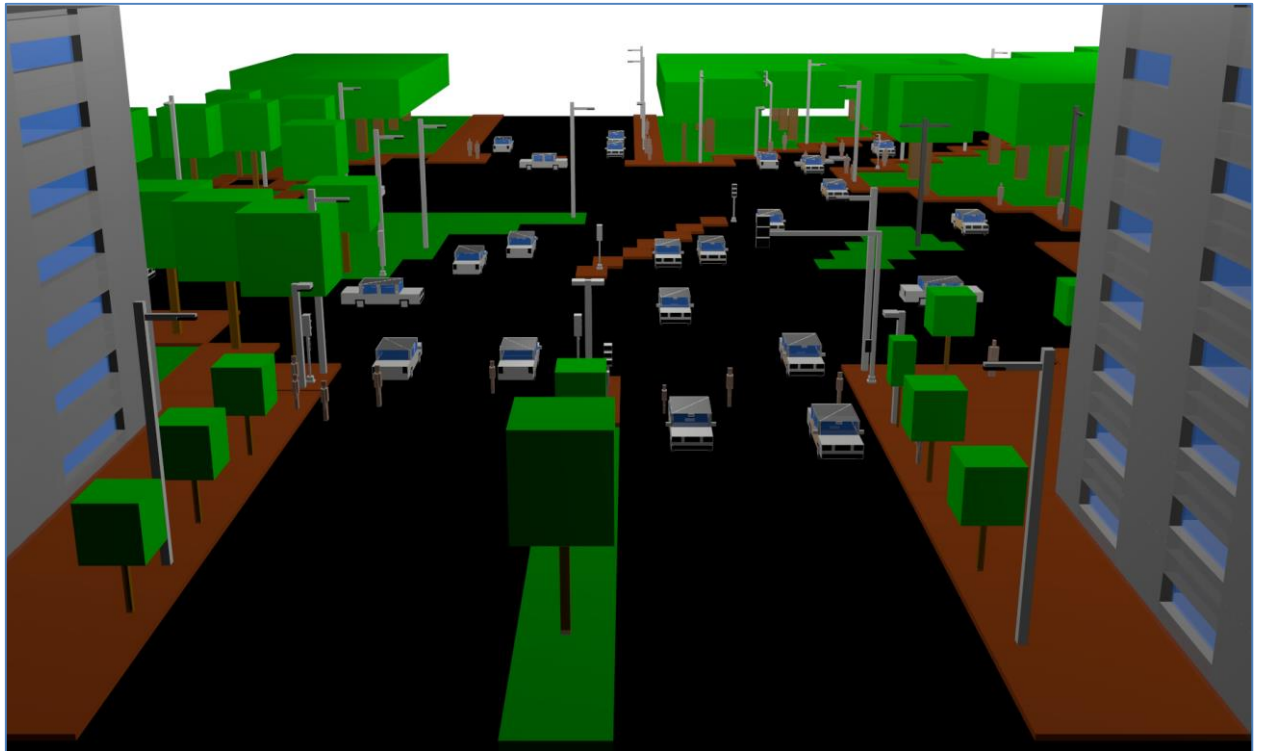


Ilustración 23: Vista ampliada 3 del escenario en Blender.

4.2 PARÁMETROS DE LA SIMULACIÓN

4.2.1 Posicionamiento de las antenas transmisoras.

Tal y como se ha comentado previamente se colocarán 16 antenas, una por cada semáforo existente en el escenario.

Con el objetivo de minimizar la interferencia con personas y vehículos, se ha decidido colocar las antenas sobre los semáforos, a 10 centímetros sobre ellos. Es decir, queremos realizar una red de sensores inalámbricos entre semáforos, y colocando la antena sobre éstos, reducimos las interferencias de todos los objetos que se sitúan a una altura más baja que éstas, y aumentamos la potencia que captarán las antenas receptoras.

Para los semáforos de mayor altura y situados sobre la carretera, hemos decidido no colocarlos en la cima de éstos, sino manteniendo la altura con el resto de semáforos, por lo que colocaremos a la base del semáforo las antenas, a una altura de unos 3.2 metros sobre el suelo. Esto nos permitirá captar mayor cantidad de potencia, al ser la distancia lineal entre antenas mínima al estar todas en el mismo plano de altura.

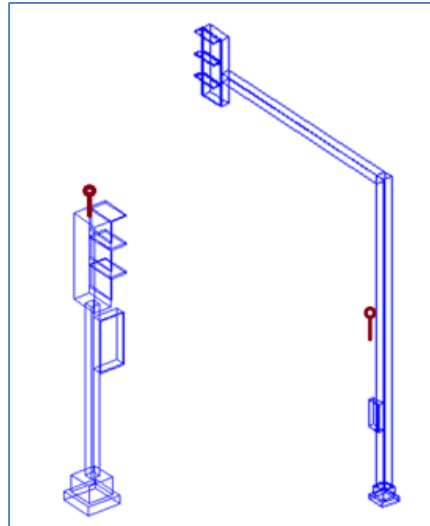


Ilustración 24: Ubicación de las antenas transmisoras en los semáforos.

4.2.2 Número de rebotes.

A la hora de realizar la simulación, hay que tener en cuenta que puesto que estamos realizando una simulación de trazado de rayos, habrá que determinar los rebotes que podrá ejercer cada uno de los rayos antes de dejar de ser considerado por el programa.

Es decir, la fuente emite cierta cantidad de rayos, que individualmente seguirán un camino recto hasta encontrarse con un obstáculo, una vez se hayan encontrado con este, se producirá una onda incidente y reflejada, que dependerá de los parámetros del material, su porosidad y morfología. Introduciendo el número máximo de rebotes en el programa, haremos que ese rayo generado por la fuente se refleje en caso de que el material así lo provoque hasta el número de rebotes indicado.

En este escenario hemos escogido 6 como el número máximo de rebotes, teniendo en cuenta que a mayor número de rebotes mayor será la precisión de los cálculos pero mayor será el cálculo computacional del equipo, por lo que la simulación tardará más en realizarse.

4.2.4 Tamaño de cubos.

A la hora de generar el escenario, se indica una resolución determinada. En el momento de simular se divide el escenario en cubos más pequeños y se calcula el nivel de potencia recibido en cada uno de esos cubos, como la suma de todas las contribuciones de los rayos que atraviesan cada uno de esos cubos. Hay que tener en cuenta que cuanto menor sea el tamaño de los cubos, mayor resolución tendrá el resultado de la simulación y será más preciso y por lo tanto, el tiempo de simulación también será mayor.

En nuestro escenario, y debido a la amplitud del mismo, y a que aun siendo amplio tenemos objetos de dimensiones reducidas, se ha decidido realizar las simulaciones con cubos de 1 y 2 metros de resolución en todos los ejes (x y z).

4.2.3 Resolución angular.

El modelo de trazado de rayos consiste en emitir un determinado número finito de rayos desde el transmisor. Éste número de rayos viene determinado por una resolución angular en la fuente, es decir, lanzaremos rayos cada variación de x grados en teta y phi. Cuanto menor sea el ángulo de separación entre rayos mayor número de éstos emitirá la antena.

Como es de esperar, a medida que aumenta el número de rayos en la simulación, aumenta el tiempo de simulación, ya que se procesa cada uno de estos rayos por separado.

En nuestro caso, hemos decidido utilizar una resolución angular de 2° , por lo que emitiremos hasta 180 rayos en un plano determinado de la esfera de radiación.

4.2.4 Divergencia.

A la hora de definir el tamaño de los cubos y la variación del ángulo con la que radiará la fuente de la simulación habrá que tener en cuenta que si los cubos son pequeños, y la fuente se sitúa a una distancia lejana, puede que los rayos generados se hayan abierto lo suficiente para no incidir ninguno de ellos en el cubo, a esto denominaremos divergencia.

Tendremos que tener cuidado con esto y habrá que aumentar el tamaño de los cubos o modificar la variación en teta y phi de generación de rayos en la fuente, para obtener resultados realistas, ya que puede ser que un cubo que debería captar la suficiente potencia no haya sido atravesado por ningún rayo y por ese motivo su nivel de potencia sea inexistente.

4.3 SIMULACIÓN

4.3.1 Descripción del escenario

El escenario a analizar se realizará sin tener en cuenta la presencia de personas que circulan por las aceras y los pasos de cebra, y sin tener en cuenta la presencia de tráfico. De tal forma que posteriormente, cuando vaya a redactarse el artículo científico relacionado con este proyecto, podremos analizar las diferencias que se obtienen entre ambos escenarios, analizando el efecto que supone la presencia de vehículos y personas cercanas a las antenas de transmisión.

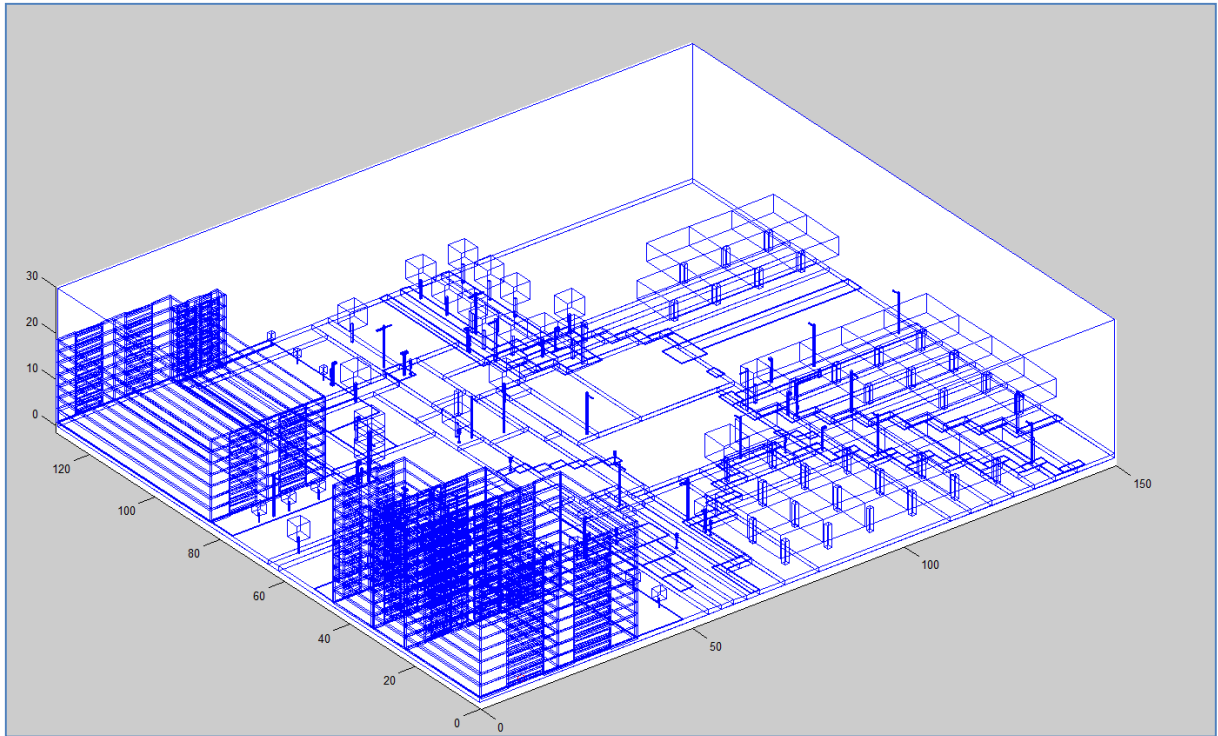


Ilustración 25: Escenario de análisis en Matlab.

Para ello colocaremos las antenas transmisoras sobre los 16 semáforos, de tal forma que tendremos 16 antenas que radiarán a 2.4GHz de forma omnidireccional.

4.3.2 Planos de potencia XY.

Simulación 1 (Antena transmisora en semáforo 1).

Tal y como se comentó previamente, se han realizado las simulaciones a resolución de cubos de 1 metro y dos metros, debido a las dimensiones del escenario y al tamaño de los obstáculos.

Si analizamos los resultados obtenidos de la simulación, vemos que para resolución de 1 metro, aparece el fenómeno conocido como divergencia. Esto se debe a que en nuestro modelo de trazado de rayos, si utilizamos cubos de pequeño tamaño, puede que los rayos no alcancen esos cubos, aunque en la realidad sí que lo harían, al tratarse de un frente de onda en lugar de un rayo.

A continuación se ofrecen los resultados obtenidos de realizar la simulación con resolución a un metro para una antena transmisora colocada a 4.40 metros de altura en el escenario de simulación, y a 3.40 metros con respecto al suelo. Se ofrecen gráficas de potencia recibida para tres alturas diferentes: A2 (de 1 a 2 metros), A3 (de 2 a 3 metros) y A4 (de 3 a 4 metros).

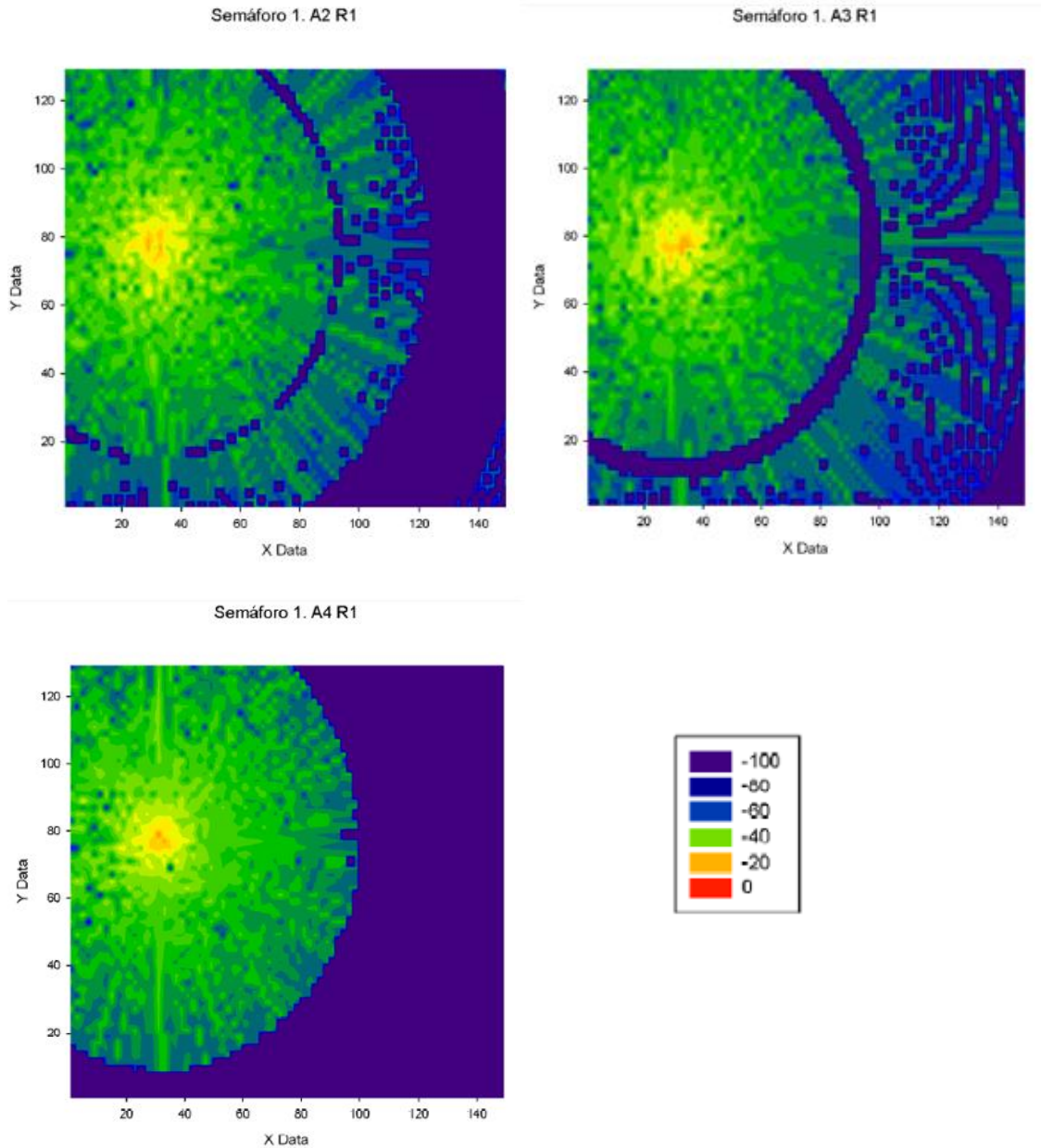


Ilustración 26: Potencia recibida con transmisor en semáforo 1 y a resolución de 1m para las tres alturas.

Podemos observar en las gráficas, como efectivamente hay cubos a los que no llega ninguno de los rayos, y como consecuencia de esto, la potencia recibida es nula (-200 dBm) a las tres alturas objetivo de análisis. Para arreglar este hecho, tenemos varias opciones:

- Hacer los cubos de mayor tamaño. Así será más probable que por el cubo atravesase uno de los rayos.
- Aumentar el número de rayos emitidos, cambiando la variación de teta y phi de la fuente transmisora.
- Aumentando el número de rebotes a tener en cuenta.

Se ha optado por reducir la resolución del escenario, aumentando el tamaño de cubo a 2 metros. Por lo tanto, analizaremos estos resultados en lugar de los obtenidos con resoluciones de metro que presentan divergencia, y que son incluidos en el Anexo I.

A continuación se ofrecen los resultados de potencia medida en dBm en los planos XY obtenidos de la simulación a resolución de 2 metros, el plano A2 se corresponde con las alturas de 2 a 4 metros, en donde estarán ubicadas las personas y los coches, mientras que el plano A3 se corresponde con el plano que va de 4 a 8 metros, y en donde están ubicadas las antenas.

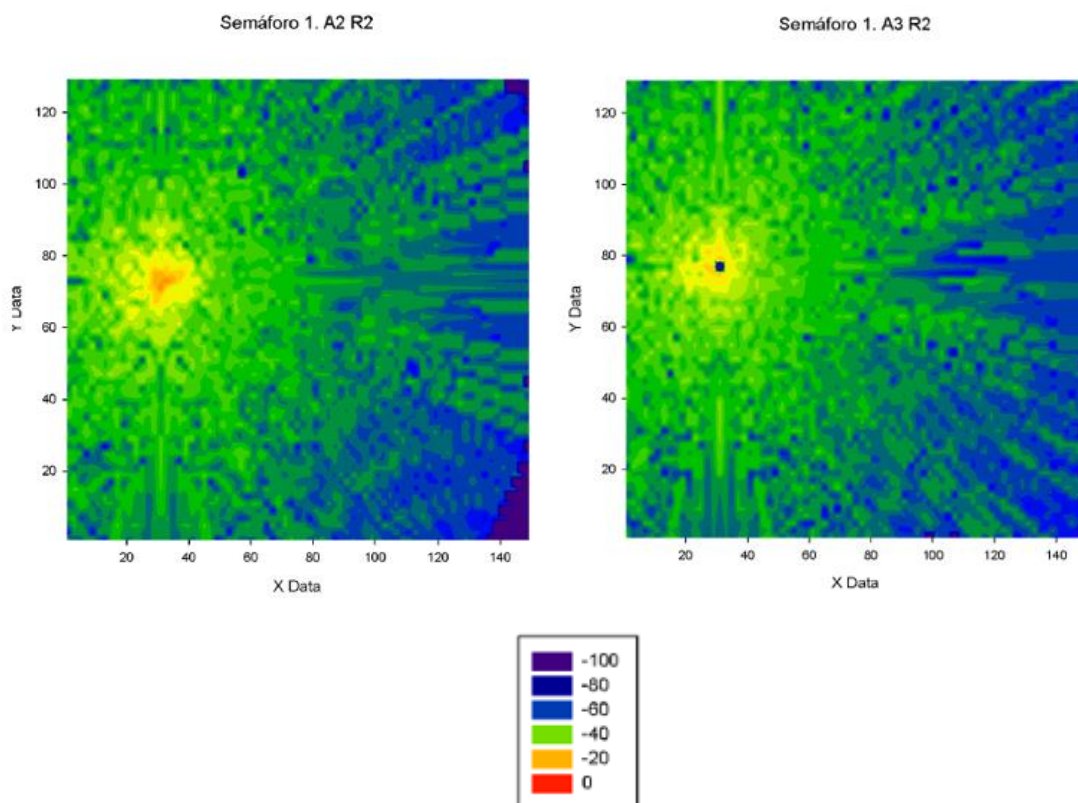


Ilustración 27: Potencia recibida con transmisor en semáforo 1 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 2 (Antena transmisora en semáforo 2).

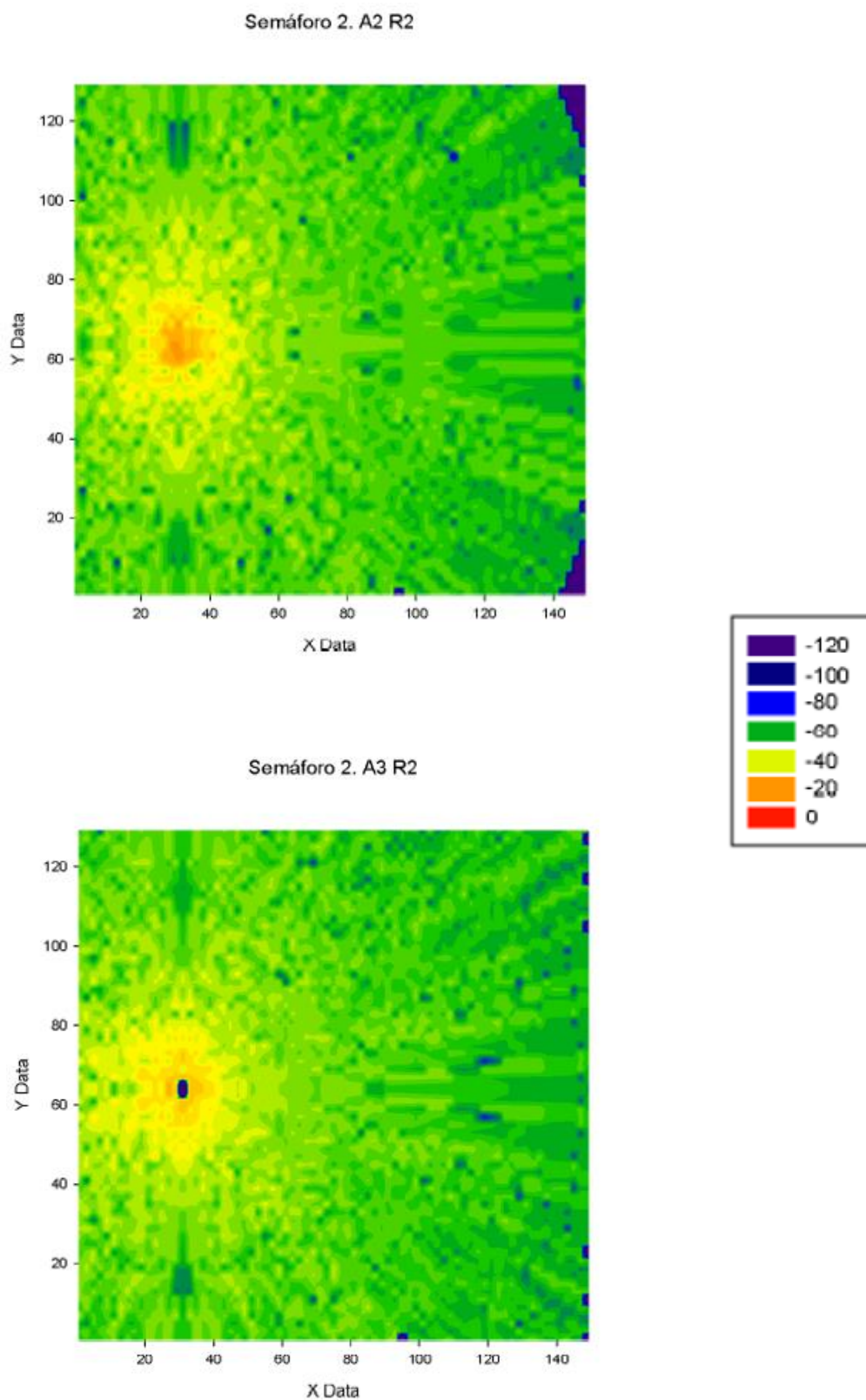


Ilustración 28: Potencia recibida con transmisor en semáforo 2 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 3 (Antena transmisora en semáforo 3).

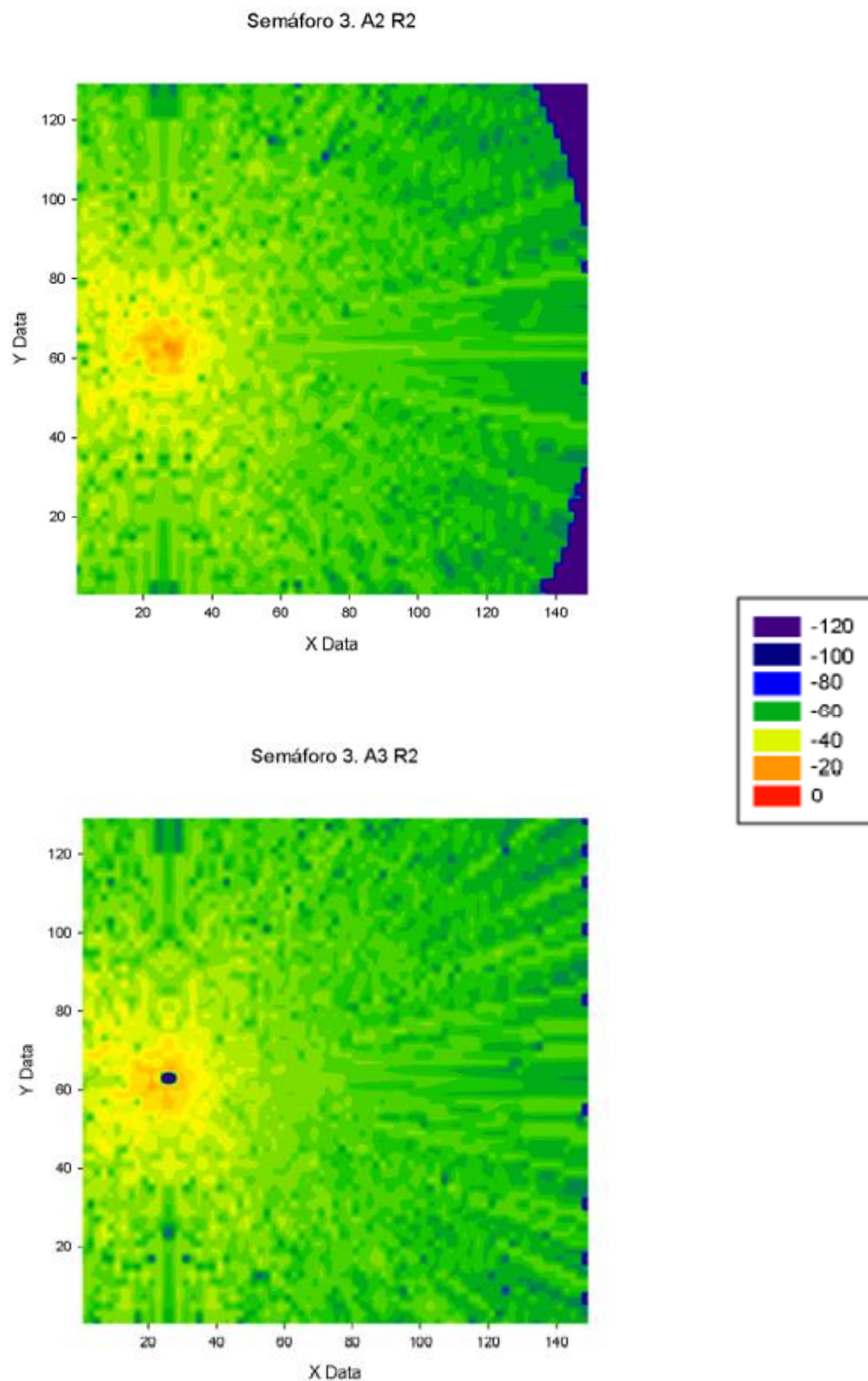


Ilustración 29: Potencia recibida con transmisor en semáforo 3 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 4 (Antena transmisora en semáforo 4).

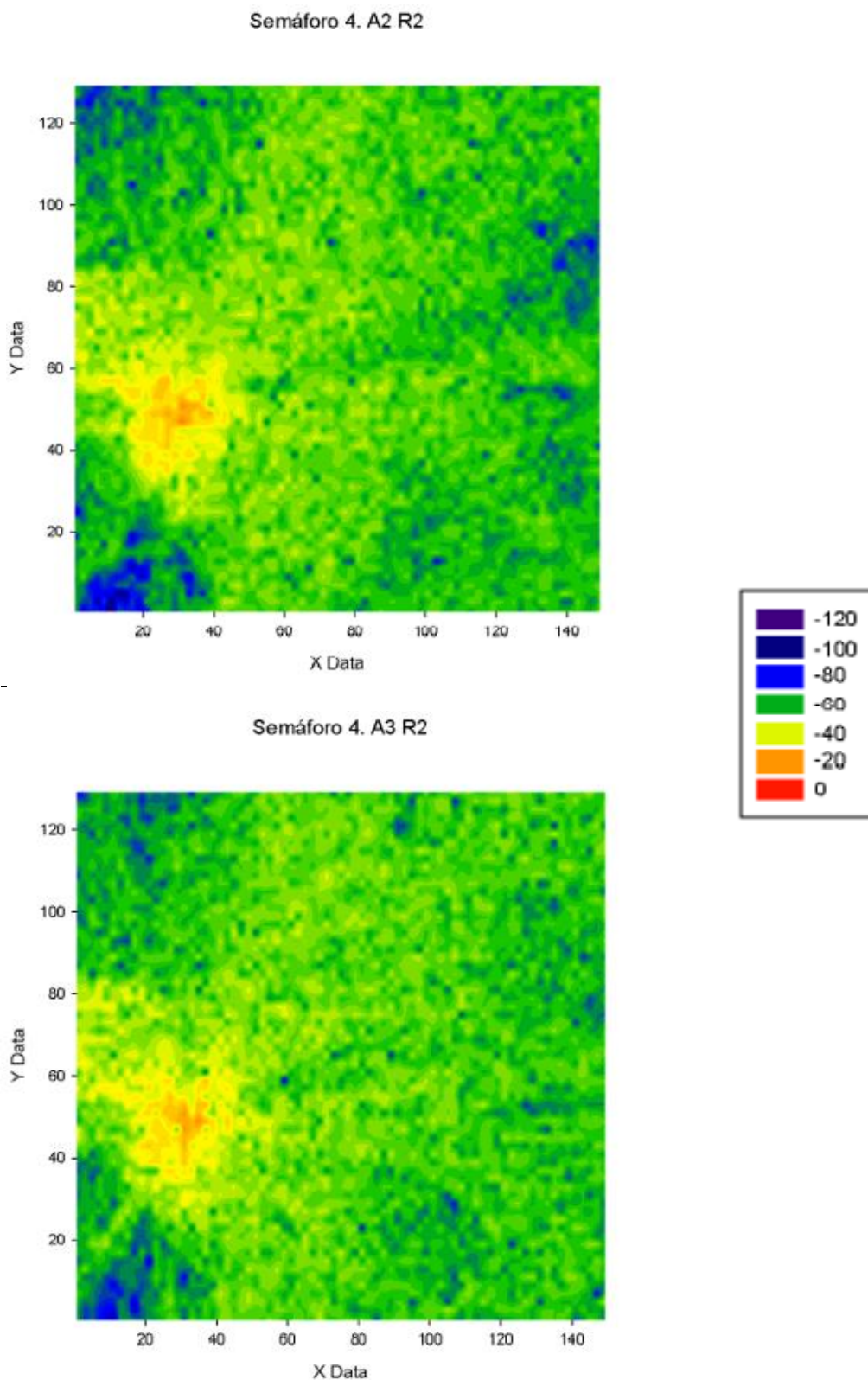


Ilustración 30: Potencia recibida con transmisor en semáforo 4 y a resolución de 2m para las dos alturas..

Simulación 5 (Antena transmisora en semáforo 5).

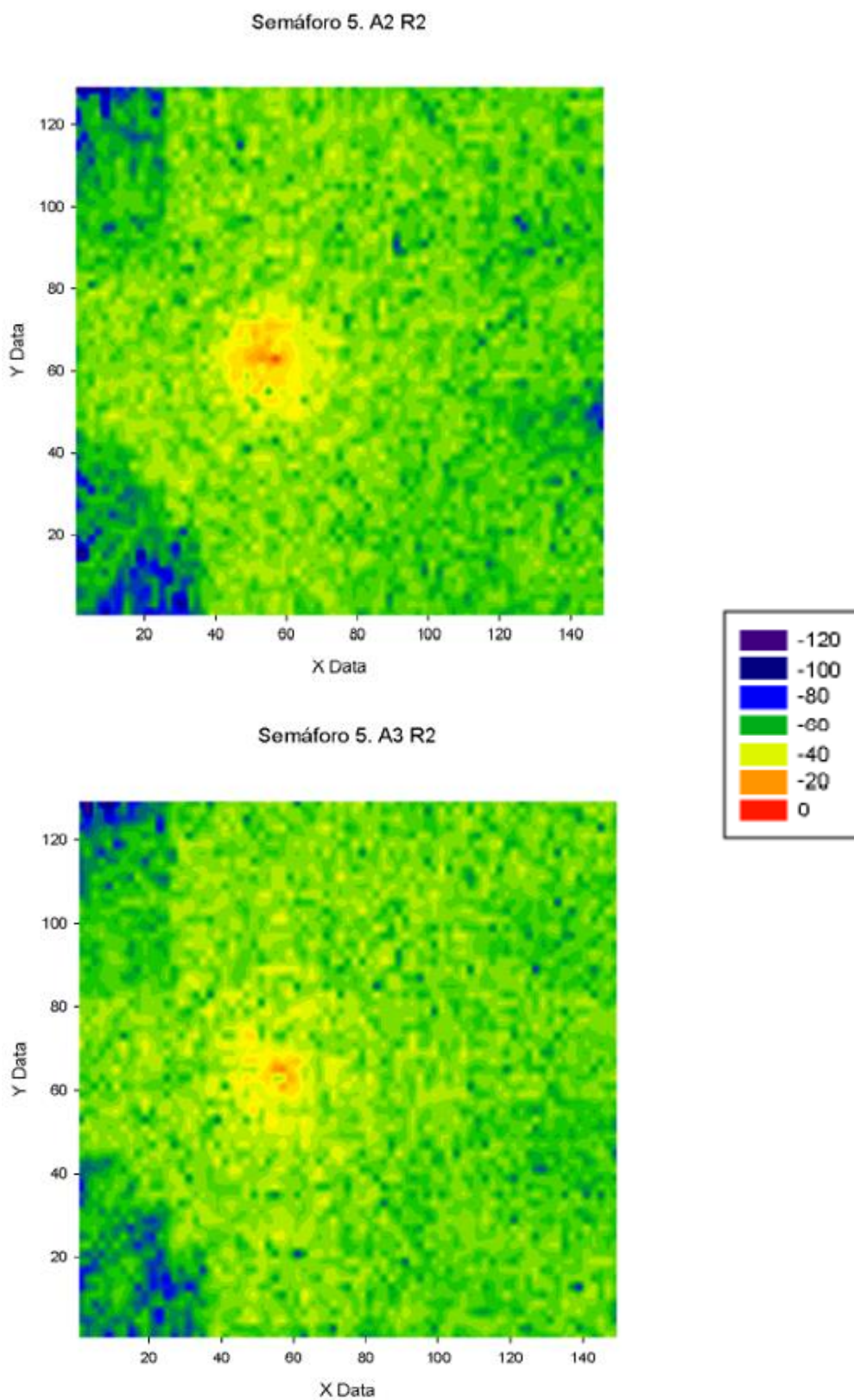


Ilustración 31: Potencia recibida con transmisor en semáforo 5 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 6 (Antena transmisora en semáforo 6).

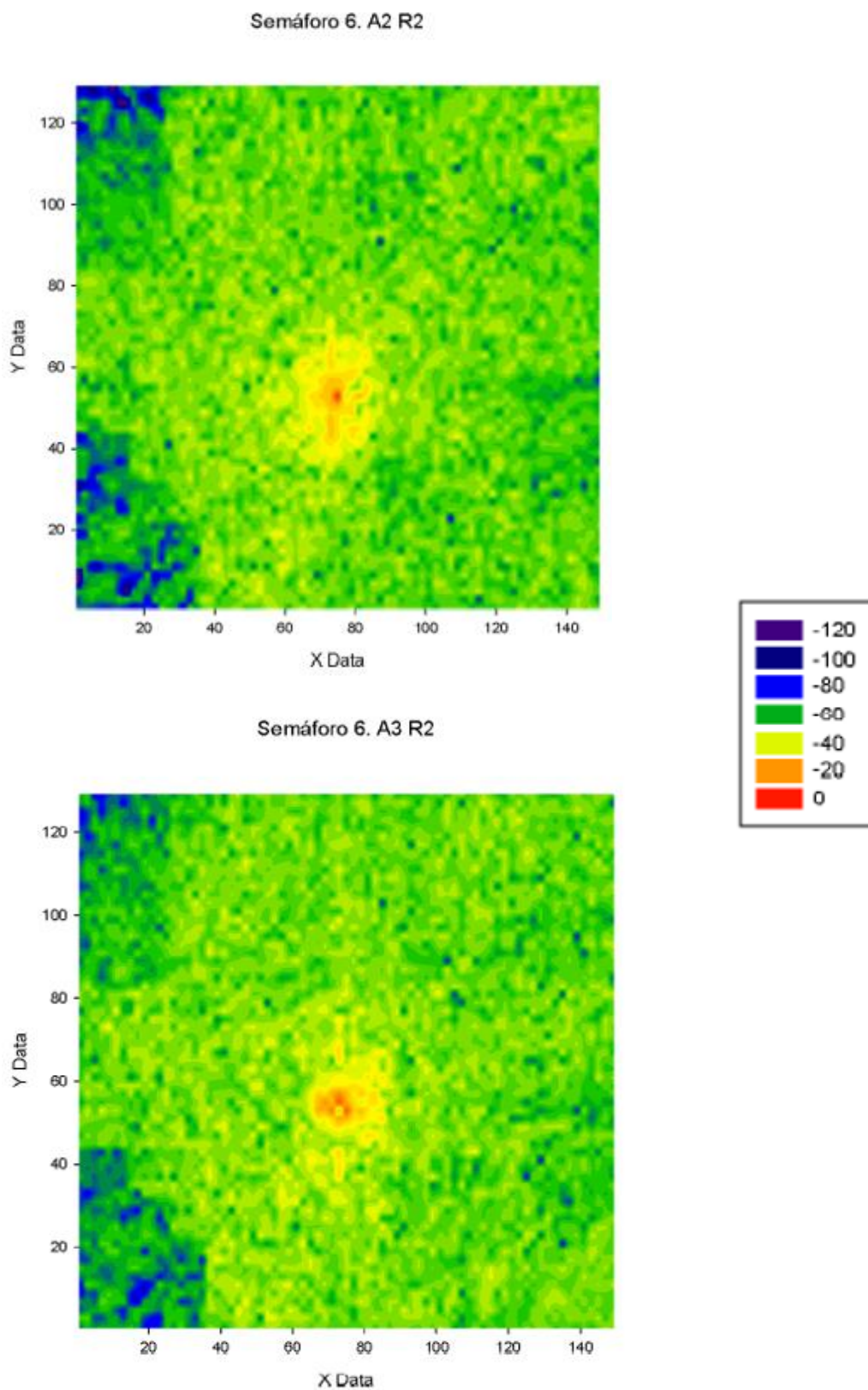


Ilustración 32: Potencia recibida con transmisor en semáforo 6 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 7 (Antena transmisora en semáforo 7).

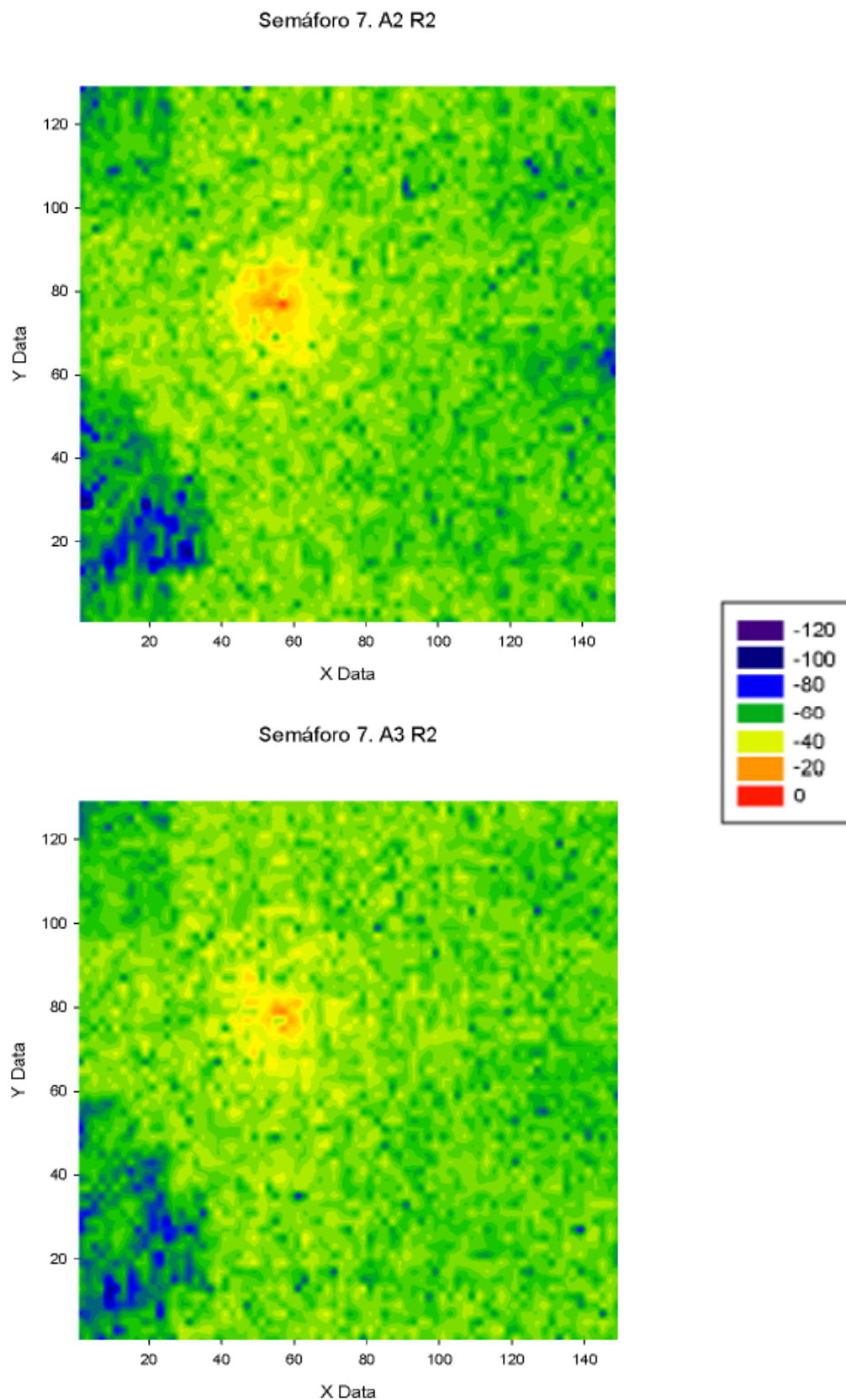


Ilustración 33: Potencia recibida con transmisor en semáforo 7 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 8 (Antena transmisora en semáforo 8).

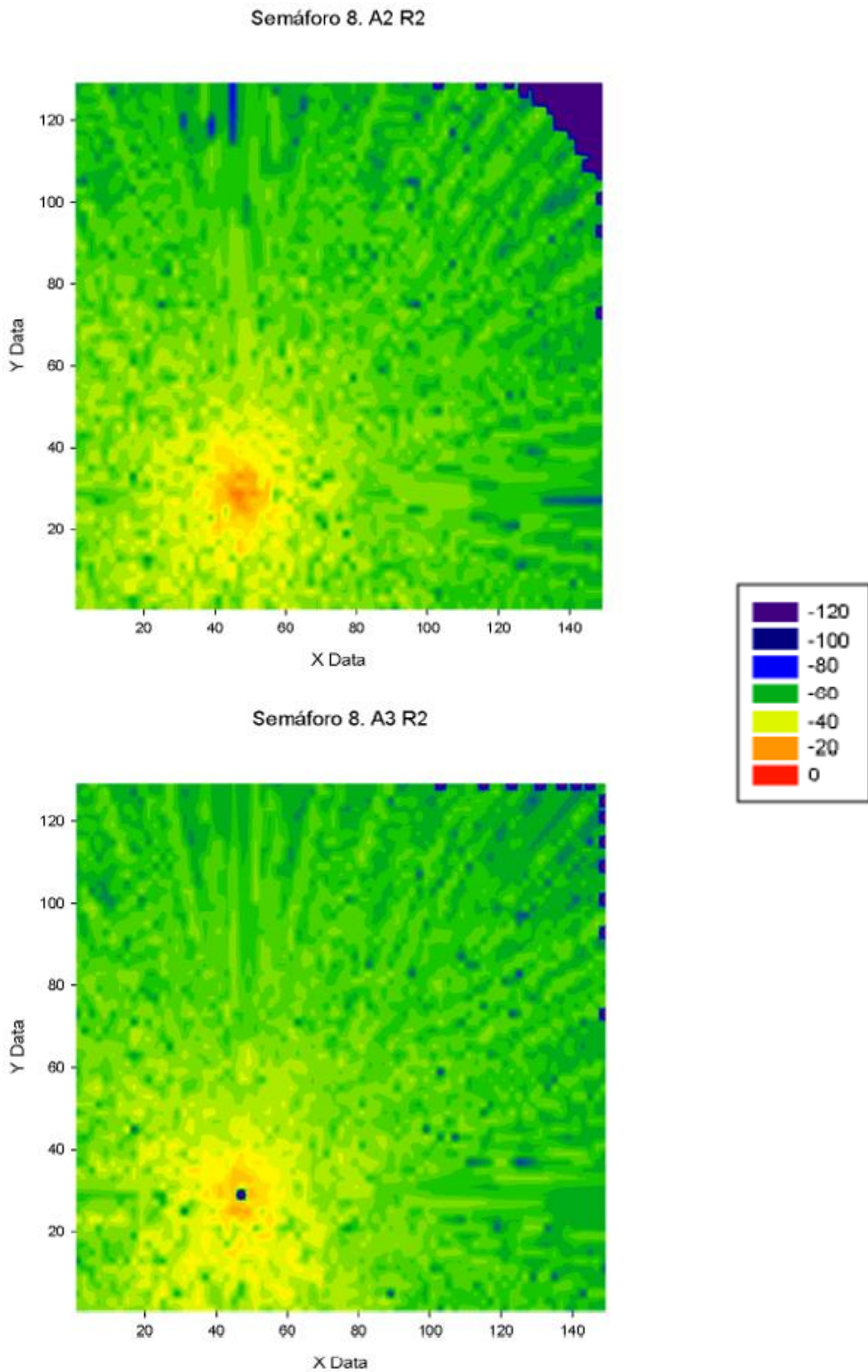


Ilustración 34: Potencia recibida con transmisor en semáforo 8 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 9 (Antena transmisora en semáforo 9).

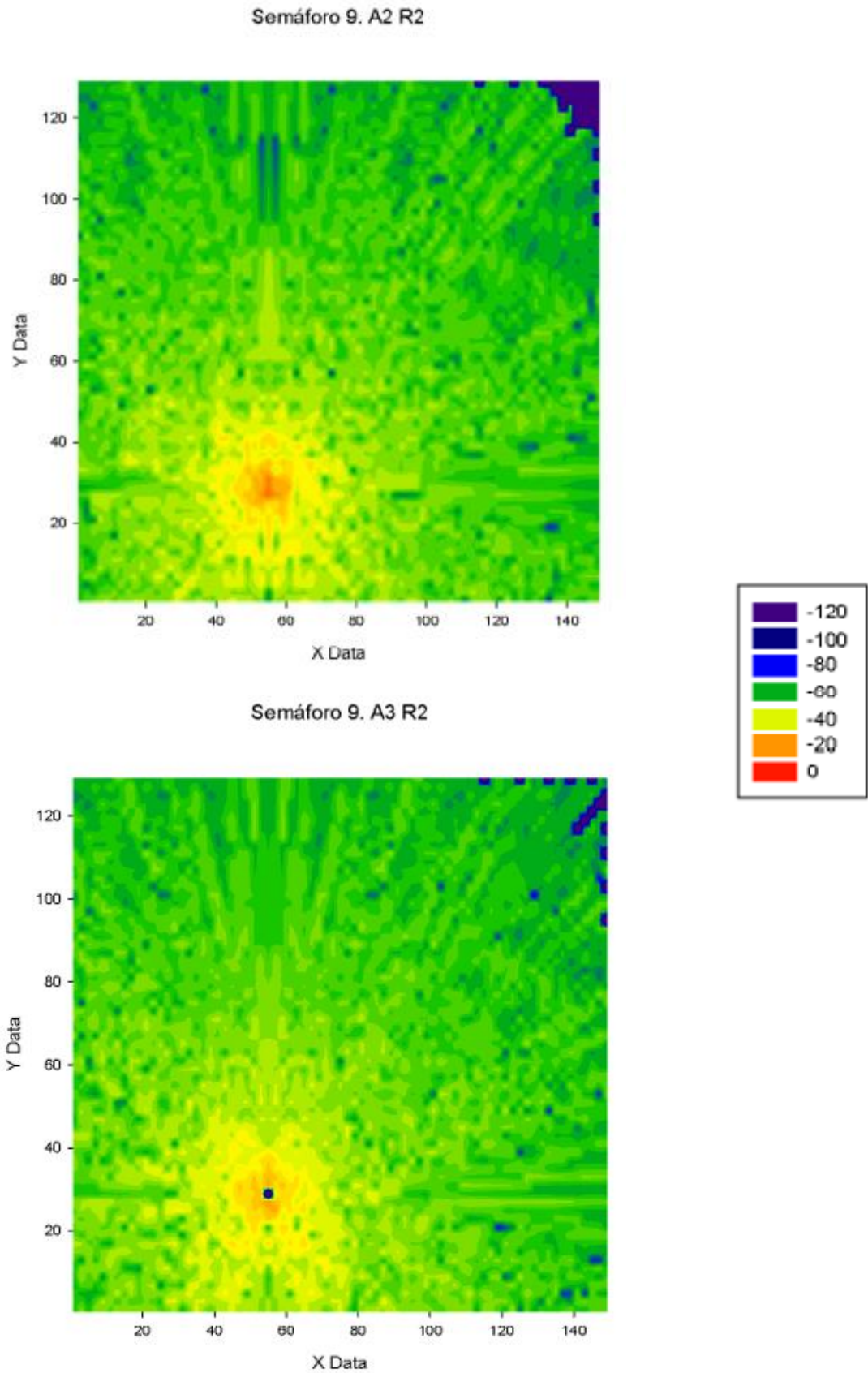


Ilustración 35: Potencia recibida con transmisor en semáforo 9 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 10 (Antena transmisora en semáforo 10).

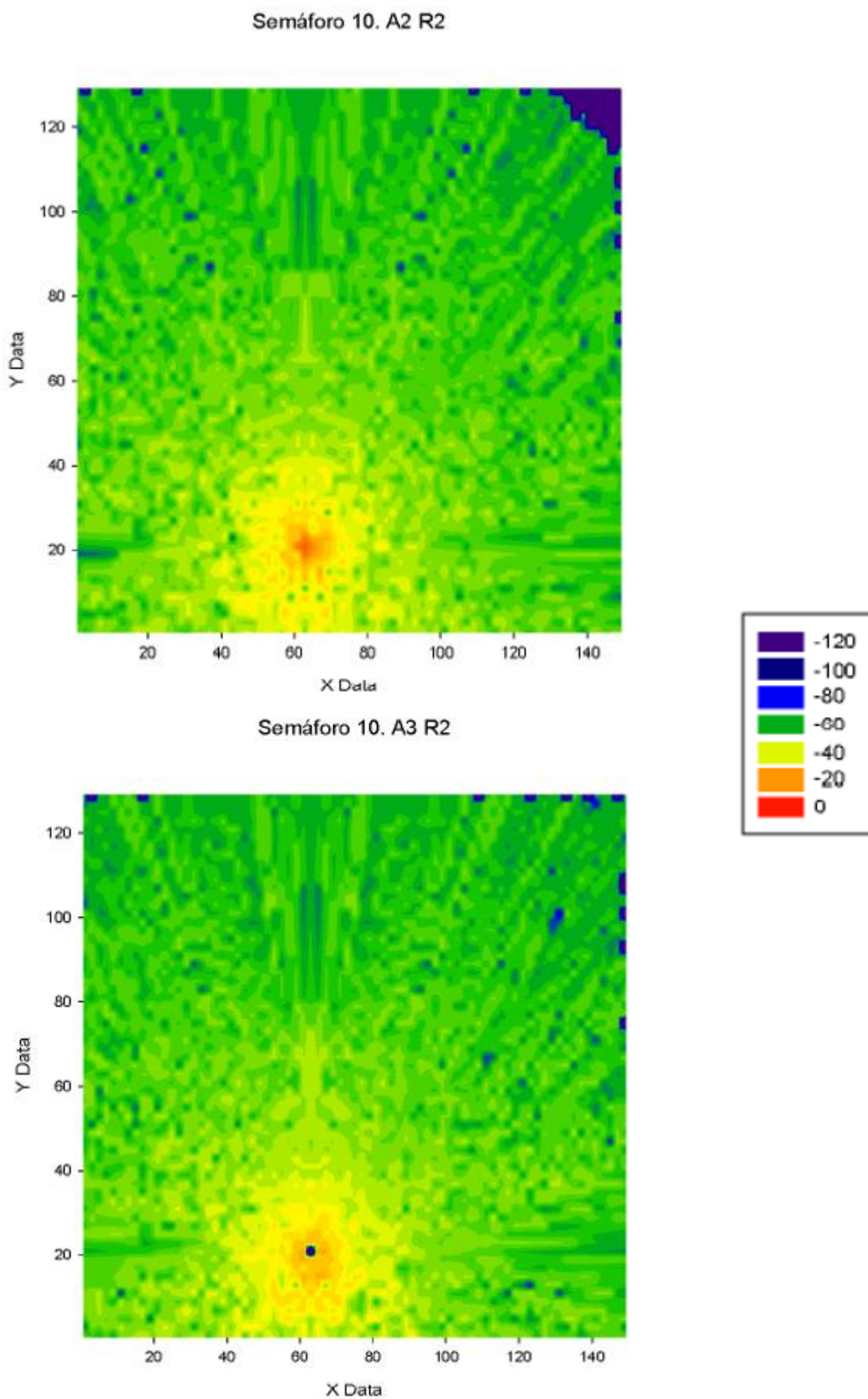


Ilustración 36: Potencia recibida con transmisor en semáforo 10 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 11 (Antena transmisora en semáforo 11).

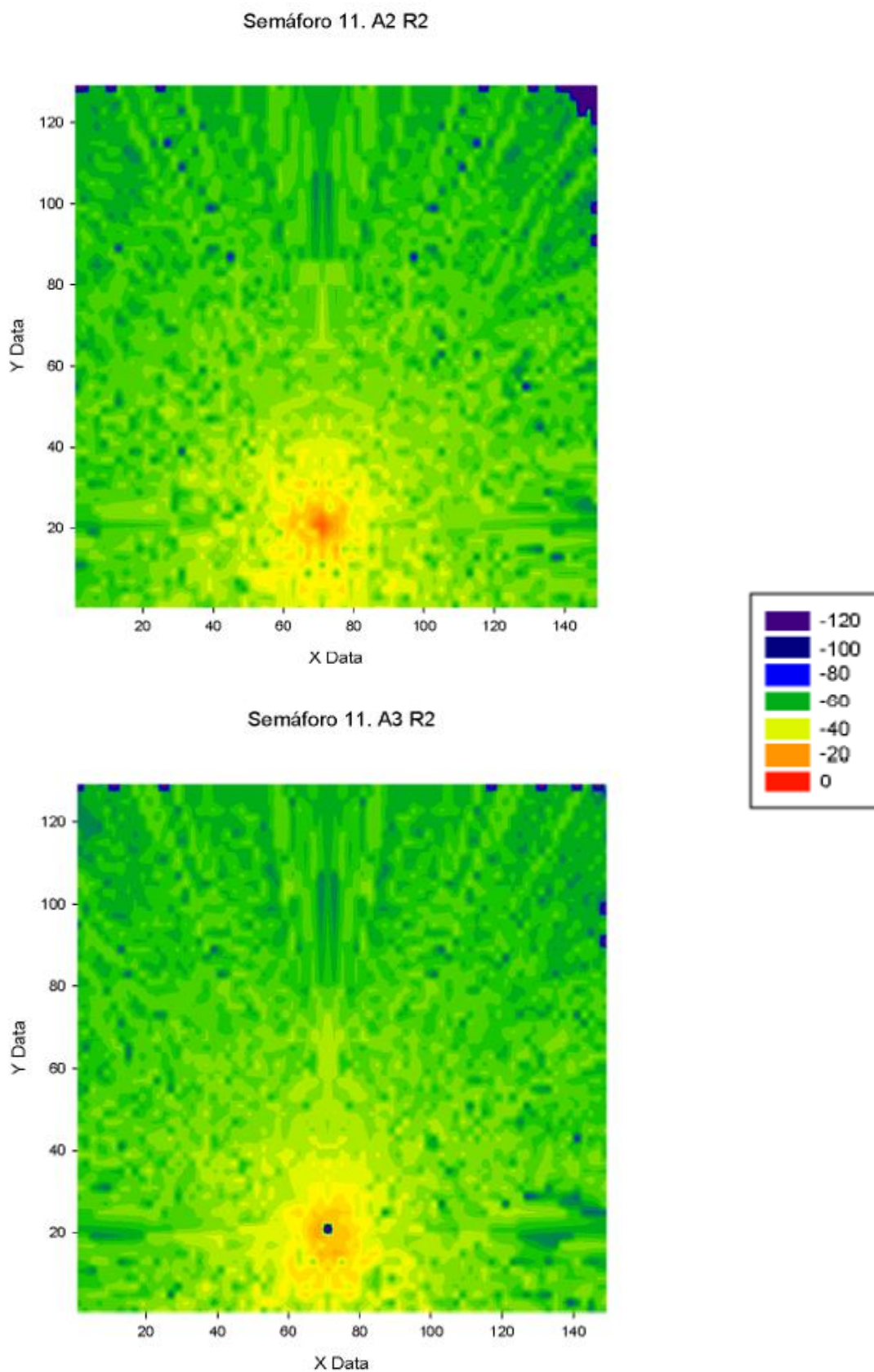


Ilustración 37: Potencia recibida con transmisor en semáforo 11 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 12 (Antena transmisora en semáforo 12).

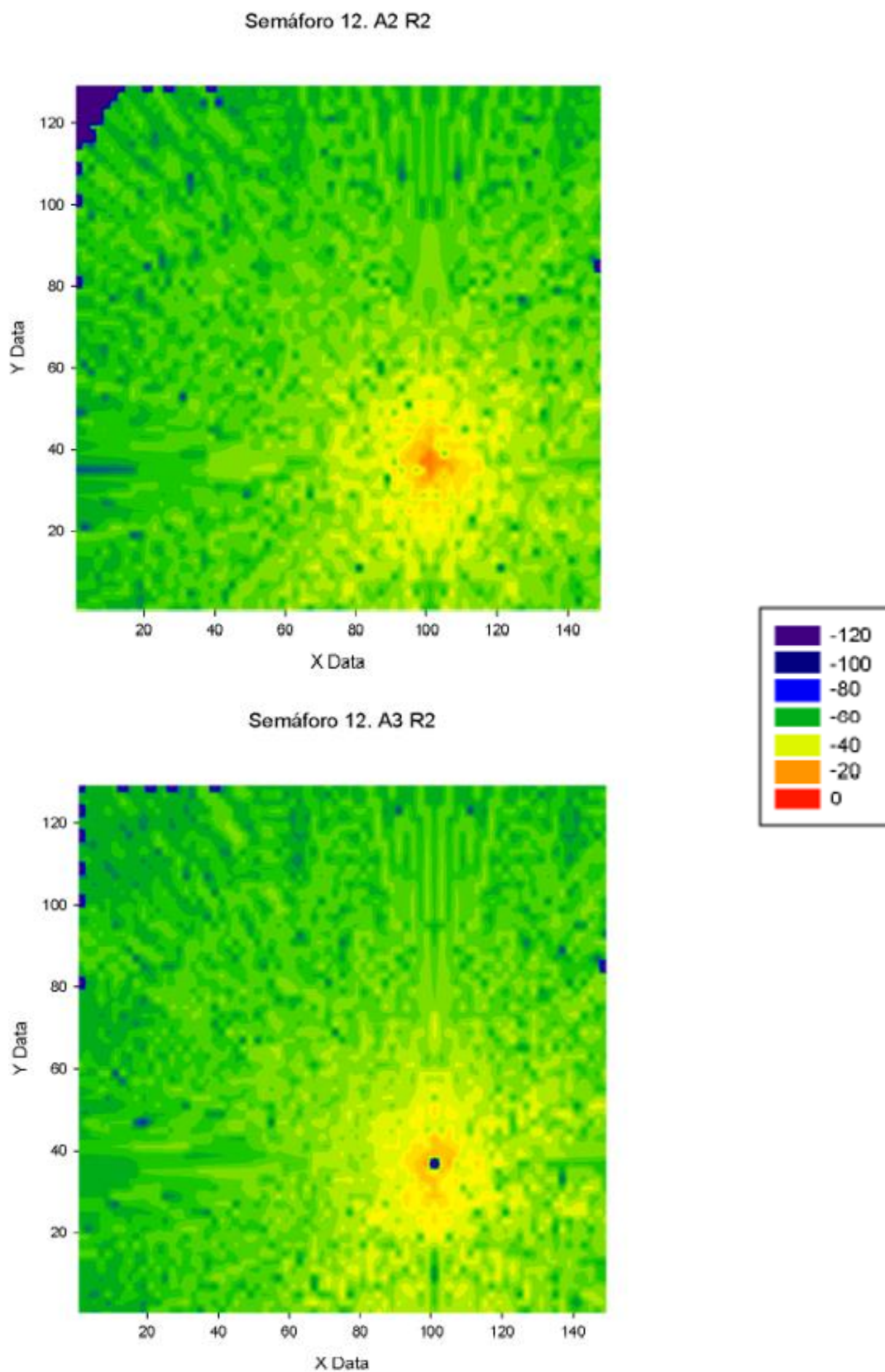


Ilustración 38: Potencia recibida con transmisor en semáforo 12 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 13 (Antena transmisora en semáforo 13).

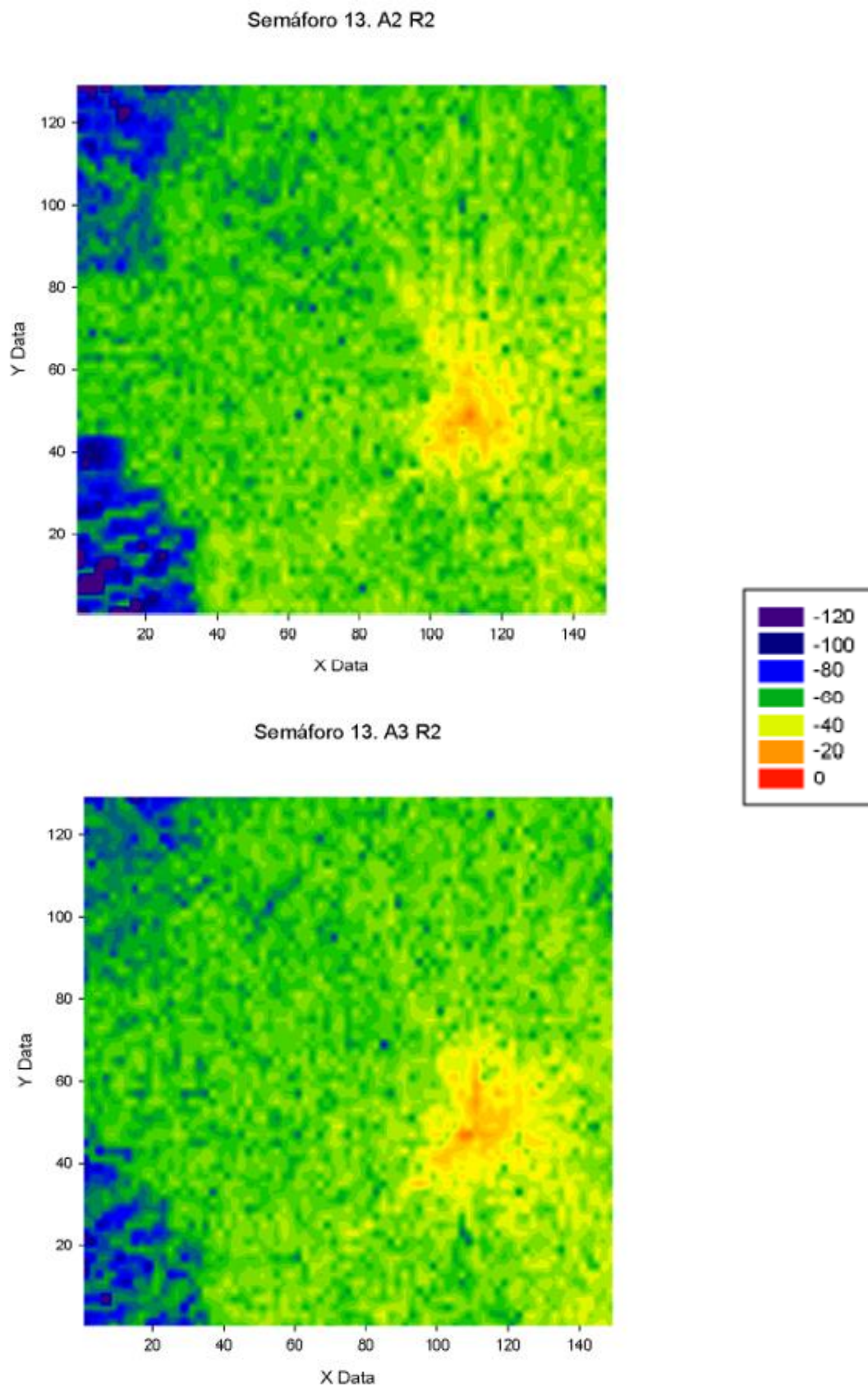
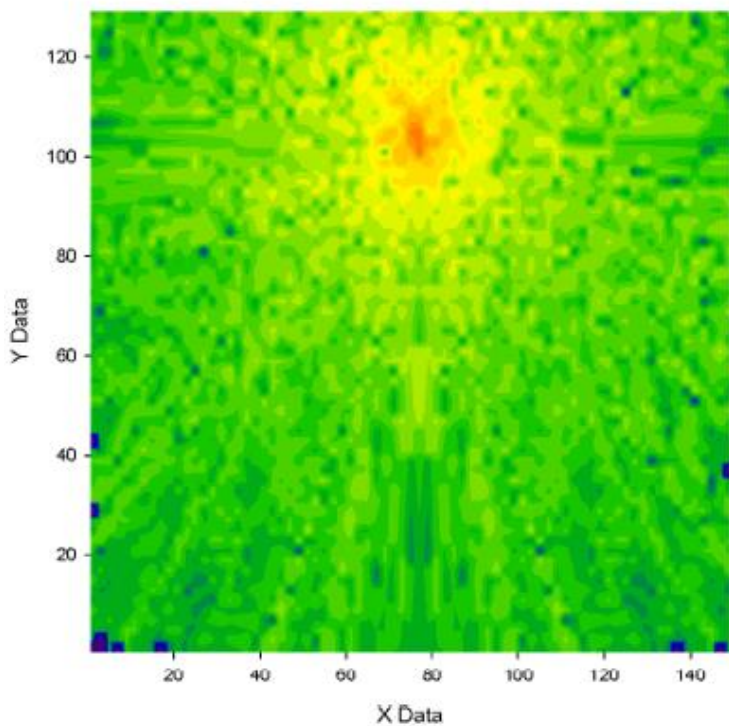


Ilustración 39: Potencia recibida con transmisor en semáforo 13 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 14 (Antena transmisora en semáforo 14).

Semáforo 14. A2 R2



Semáforo 14. A3 R2

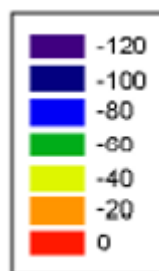
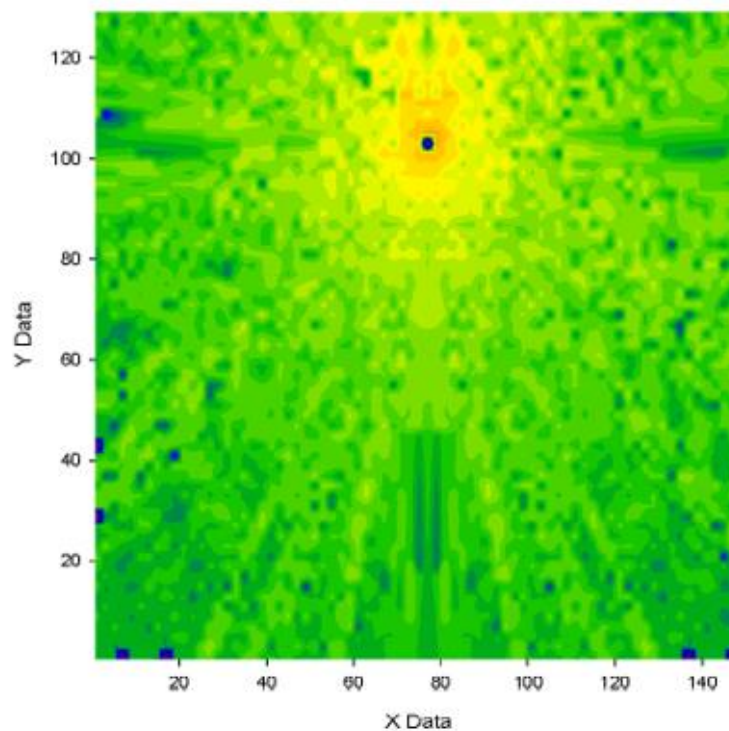
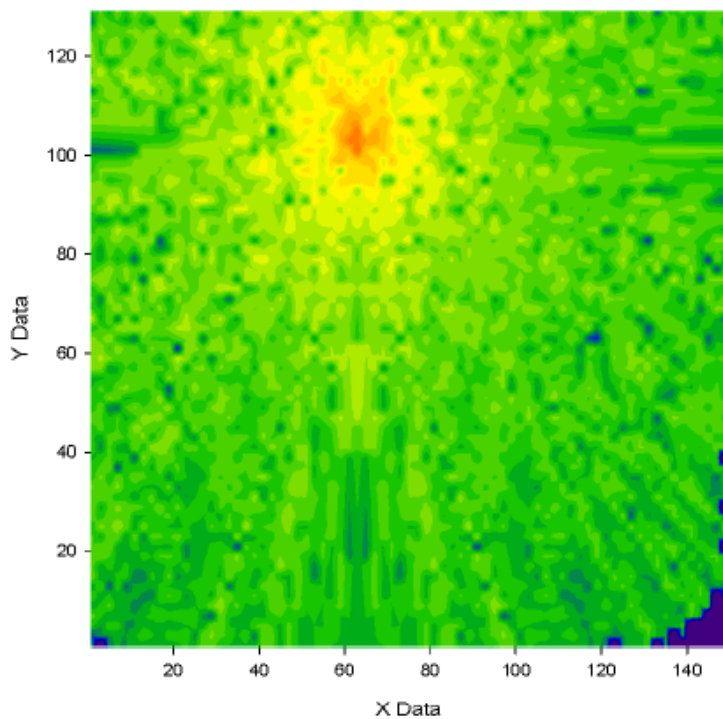


Ilustración 40: Potencia recibida con transmisor en semáforo 14 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 15 (Antena transmisora en semáforo 15).

Semáforo 15. A2 R2



Semáforo 15. A3 R2

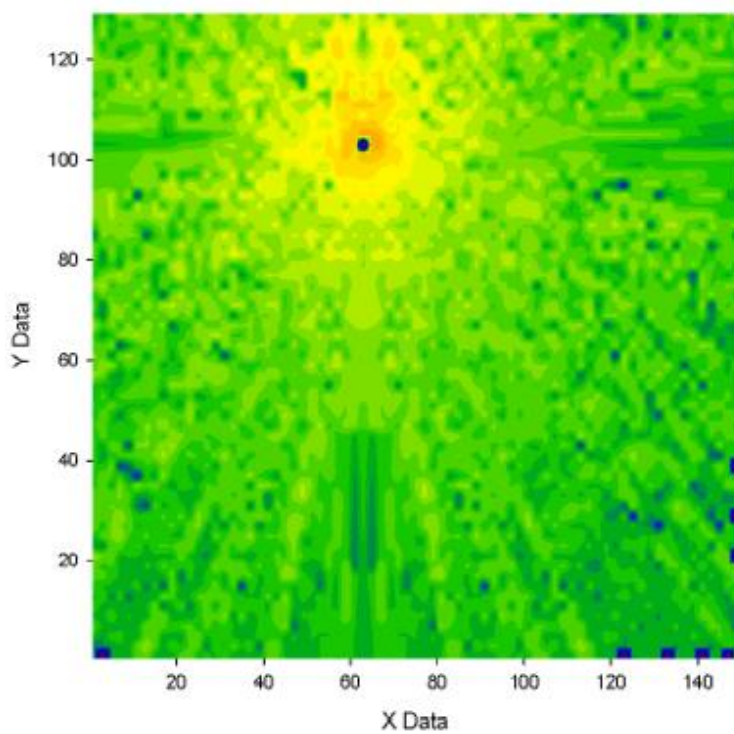


Ilustración 41: Potencia recibida con transmisor en semáforo 15 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Simulación 16 (Antena transmisora en semáforo 16).

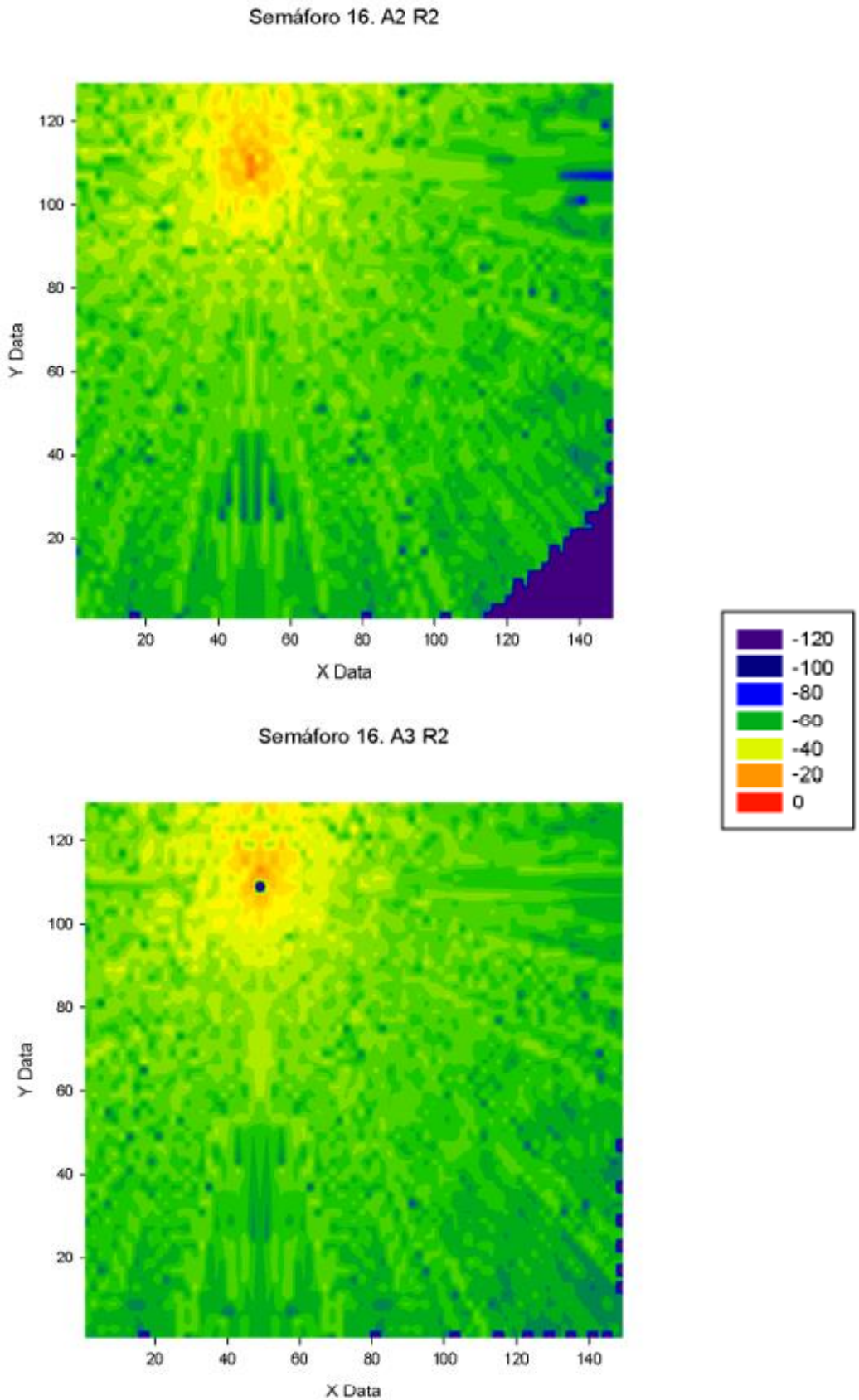


Ilustración 42: Potencia recibida con transmisor en semáforo 16 y a resolución de 2m para las dos alturas.

Si analizamos los resultados obtenidos en los planos de potencia XY, podemos ver como para la altura A3 que comprende el plano de altura de 4 a 6 metros, hay menos superficie de color azulada, que indica que la potencia es inferior a -100 dBm, esto se debe a que ese es el plano en el que están colocadas las antenas, concretamente a 4.2 metros de altura.

Sin embargo en estos planos aparecen ciertos puntos que presentan divergencia, como la propia posición de la antena, en donde aparece un círculo azulado, que en los resultados para la altura A2 que comprende de 2 a 4 metros no aparecen, esto se debe a que los rebotes de los rayos que lanza la fuente tienen más cabida en este plano de altura, al estar más próximo al suelo.

Si nos centramos en ejemplos concretos, para los semáforos 1, 2, 3, 15 y 16 es difícil transmitir potencia a la esquina inferior derecha del escenario, ya que está rodeada de un conjunto de árboles que debido a las propiedades dieléctricas del follaje, tronco y césped producirán cierta absorción de las ondas.

Con los semáforos 4, 5, 6, 12, 13 también aparecen zonas donde no llega la potencia suficiente, como serían las esquinas izquierdas del escenario, debido a la presencia de los dos edificios allí ubicados, y cuyo material principal, el hormigón producirá la reflexión de la mayoría de rayos.

Por lo demás, observando las gráficas, se puede intuir por donde están ubicadas las aceras y las carreteras del escenario, ya que el resto de zonas como edificios y zonas de árboles producen una mayor atenuación de la potencia recibida que se puede apreciar levemente en las gráficas.

4.3.3 Planos de potencia ZY.

En el siguiente apartado, se mostrarán los resultados obtenidos de potencia recibida para la resolución de 2 metros, pero en lugar de analizar los planos XY tomando una altura fija, fijaremos la coordenada X, de tal forma que mostraremos una gráfica con el nivel de potencia en función de la altura y la coordenada Y del escenario.

Para ello se ha incluido un gráfico para cada una de las 16 simulaciones, de tal forma que fijaremos la coordenada X en la posición en la que se ubique el semáforo donde está la antena transmisora de la simulación.

Si analizamos esas gráficas, vemos como efectivamente en las alturas más bajas y en las coordenadas Y en donde se ubica el semáforo tenemos mayor cantidad de potencia como es lógico al estar cercana la fuente, y esta potencia va disminuyendo con la altura. También es lógico, que aunque haya la misma distancia de la fuente en vertical hacia el suelo o hacia el cielo, será la parte más cercana al suelo la que tendrá mayor cantidad de potencia debido a reflexiones.

También es reseñable, que debido a la divergencia que se ha comentado previamente, en algunas gráficas aparece junto a la fuente una zona donde prácticamente no se recibe potencia, algo que no tiene sentido y que se solucionaría aumentando el número de rayos que emite la fuente o la resolución angular, influyendo claro está en el tiempo de simulación, que lo multiplicaría por un factor alto.

A continuación se ofrecen las gráficas comentadas:

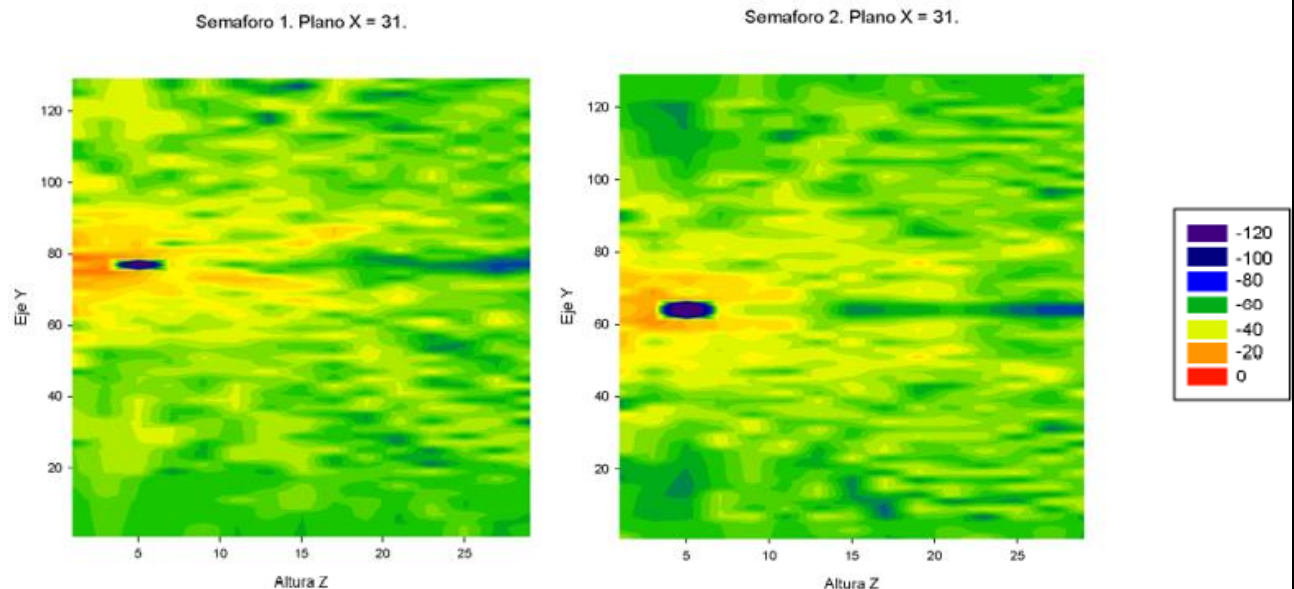


Ilustración 43: Plano ZY para simulación en semáforo 1 y semáforo 2

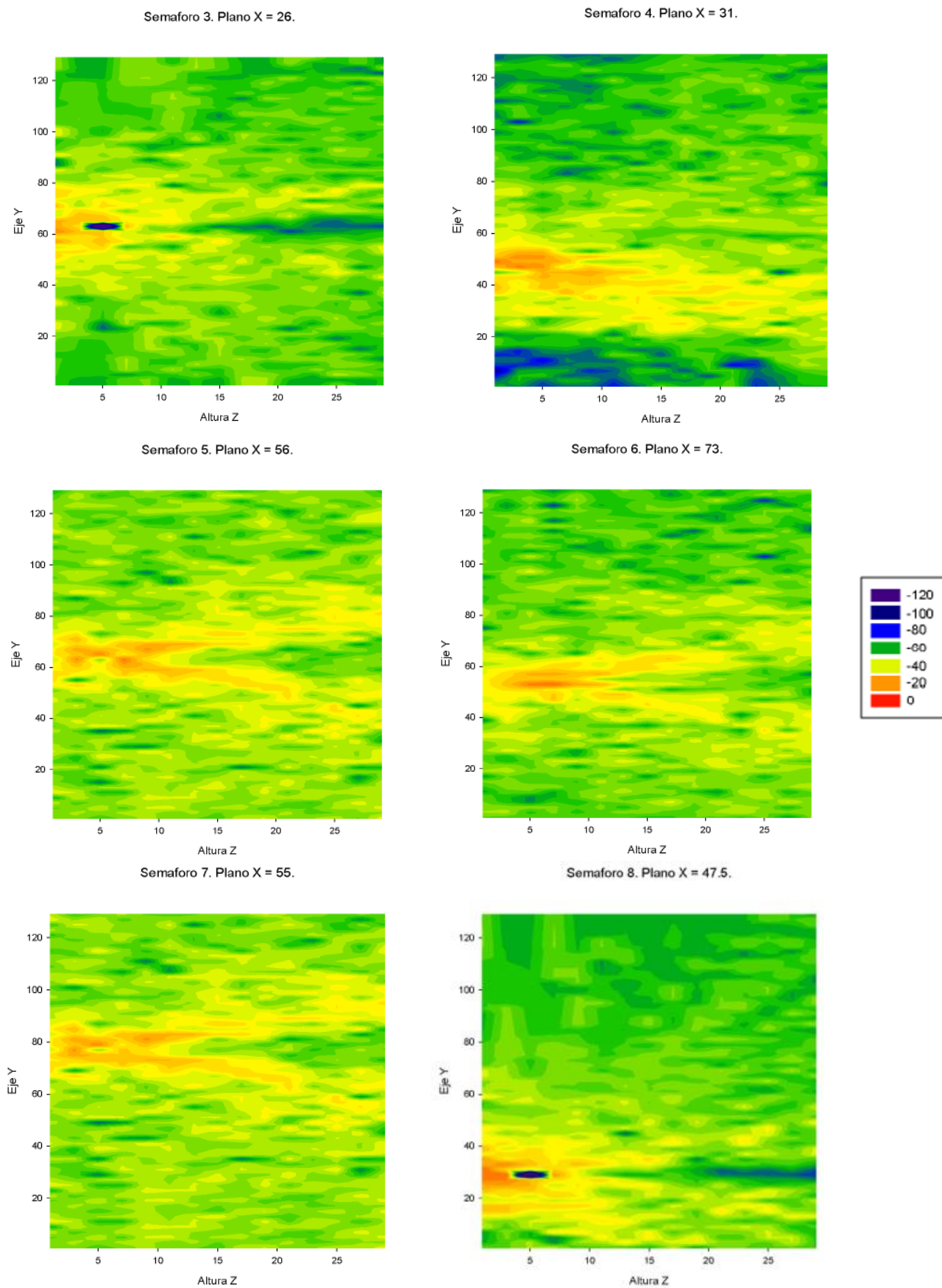


Ilustración 44: Plano ZY para simulación en semáforos 3, 4, 5, 6, 7, y 8.

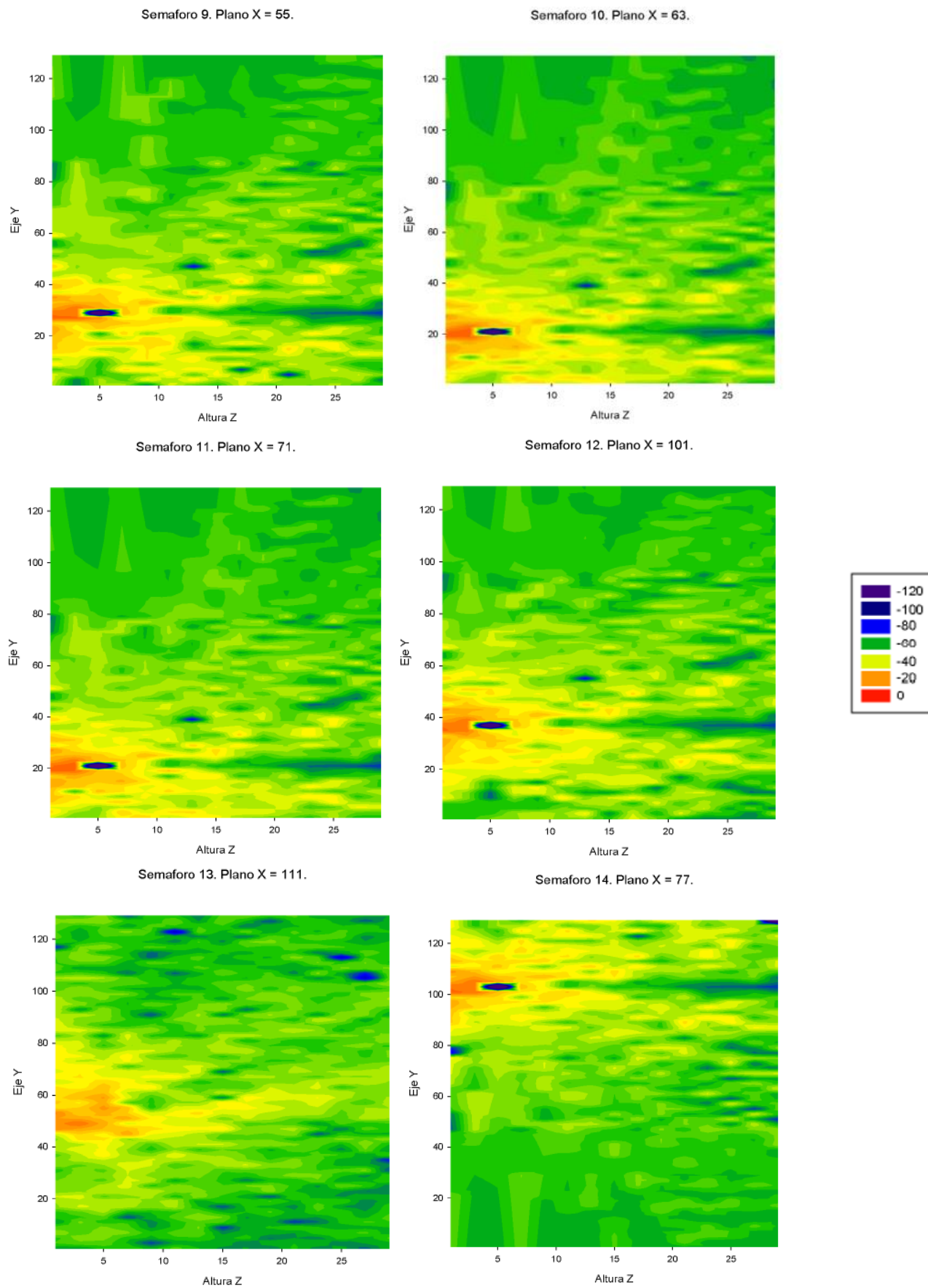


Ilustración 45: Plano ZY para simulación en semáforos 9, 10, 11, 12, 13 y 14.

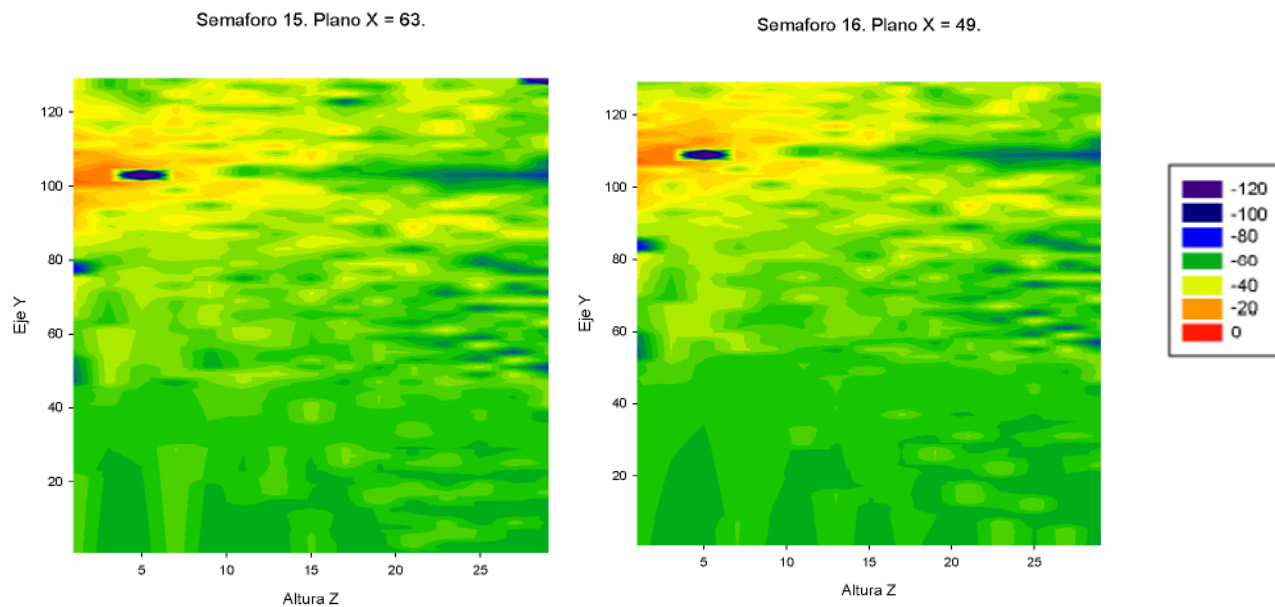


Ilustración 46: Plano ZY para simulación en semáforos 15 y 16.

4.3.4 Delay Spread.

En el siguiente apartado, analizaremos el “Delay Spread”, consistente en la diferencia de retardos entre la primera componente de multitrayecto que ha atravesado el cuboide, y la última componente que lo realiza.

Para ello se ha obtenido una gráfica de Delay Spread por cada una de las simulaciones, a la altura en la que están ubicadas las antenas sobre los semáforos.

Si analizamos las gráficas obtenidas, en primer lugar vemos como la distribución de retardos en las gráficas de los semáforos 1, 2, 3, 8, 9, 11, 12, 14, 15 y 16 son muy uniformes, mientras que las de los semáforos 4, 5, 6 y 13 presentan mayores diferencias y se aprecian trazadas que recorren el gráfico con el mismo retardo.

En casi todas las gráficas, el máximo retardo que aparece entre el primer y el último rayo recibido es de $2 * 10^{-6}$ segundos, aunque en alguna de las simulaciones llega a alcanzarse $2.5 * 10^{-6}$ segundos.

Se puede apreciar como en las zonas en donde no llegan tantas componentes procedentes de rebotes de los rayos transmitidos por la fuente, ya sea debido a reflexión en el caso de los edificios, o debido a absorción por la presencia de árboles, los retardos son inferiores, ya que los rayos que han sido rebotados, habrán recorrido más camino y por lo tanto estarán más atenuados al llegar a la presencia de los edificios o árboles, y acaban de atenuarse del todo. El hecho de que alguna gráfica sea tan uniforme se debe a que los rayos no están interactuando con los objetos de manera total, por lo que con una mayor resolución angular y menor tamaño de los cuboides obtendríamos resultados más precisos, aumentando eso sí, el tiempo computacional.

A continuación se ofrecen las gráficas comentadas:

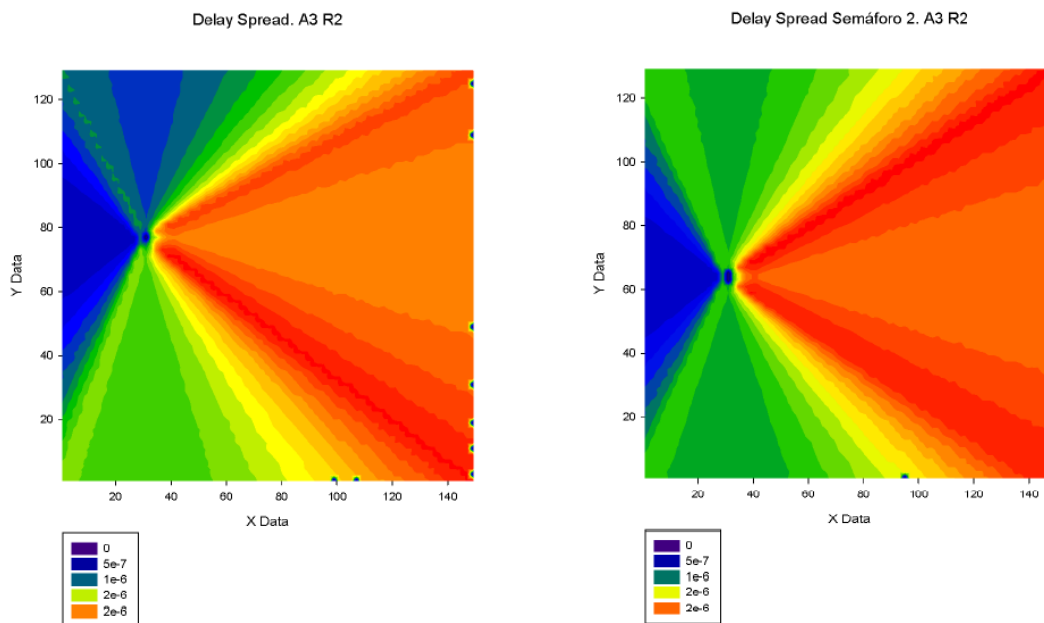


Ilustración 47: Delay Spread semáforos 1 y 2 a altura de 4 a 6 metros.

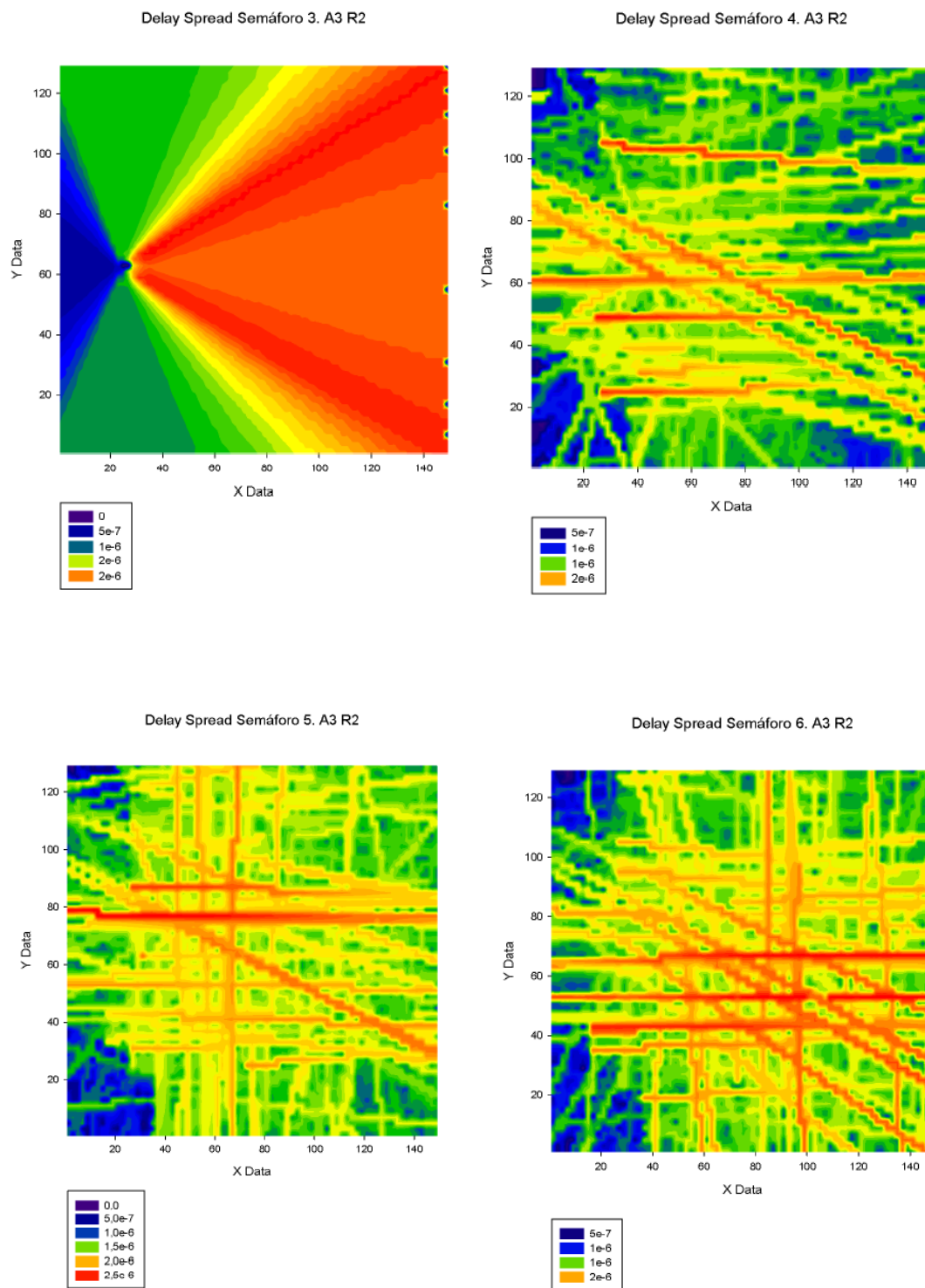


Ilustración 48: Delay Spread obtenido en semáforos 3, 4, 5, y 6 a altura de 4 a 6 metros.

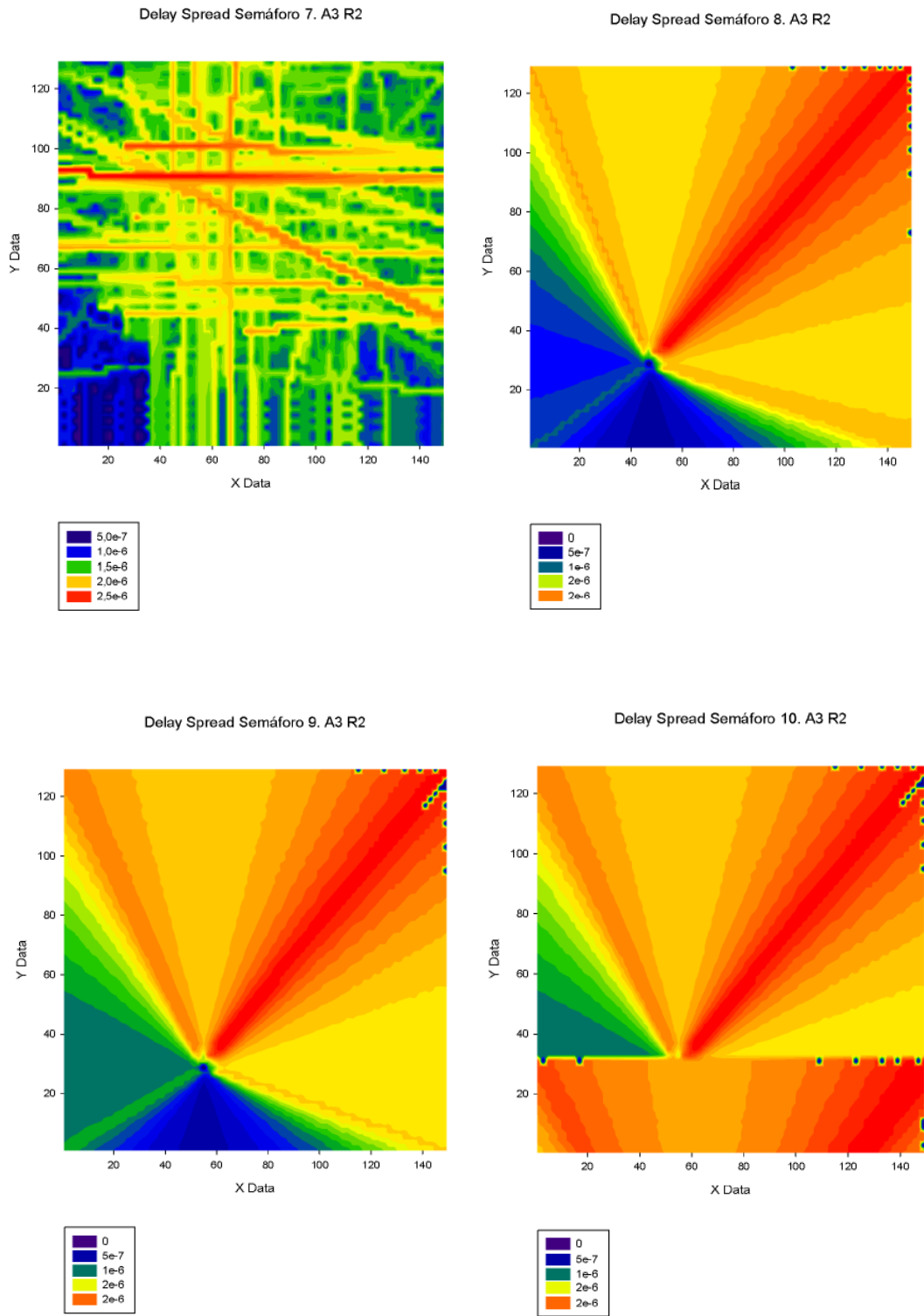


Ilustración 49: Delay Spread en semáforos 7, 8, 9 y 10 a altura de 4 a 6 metros.

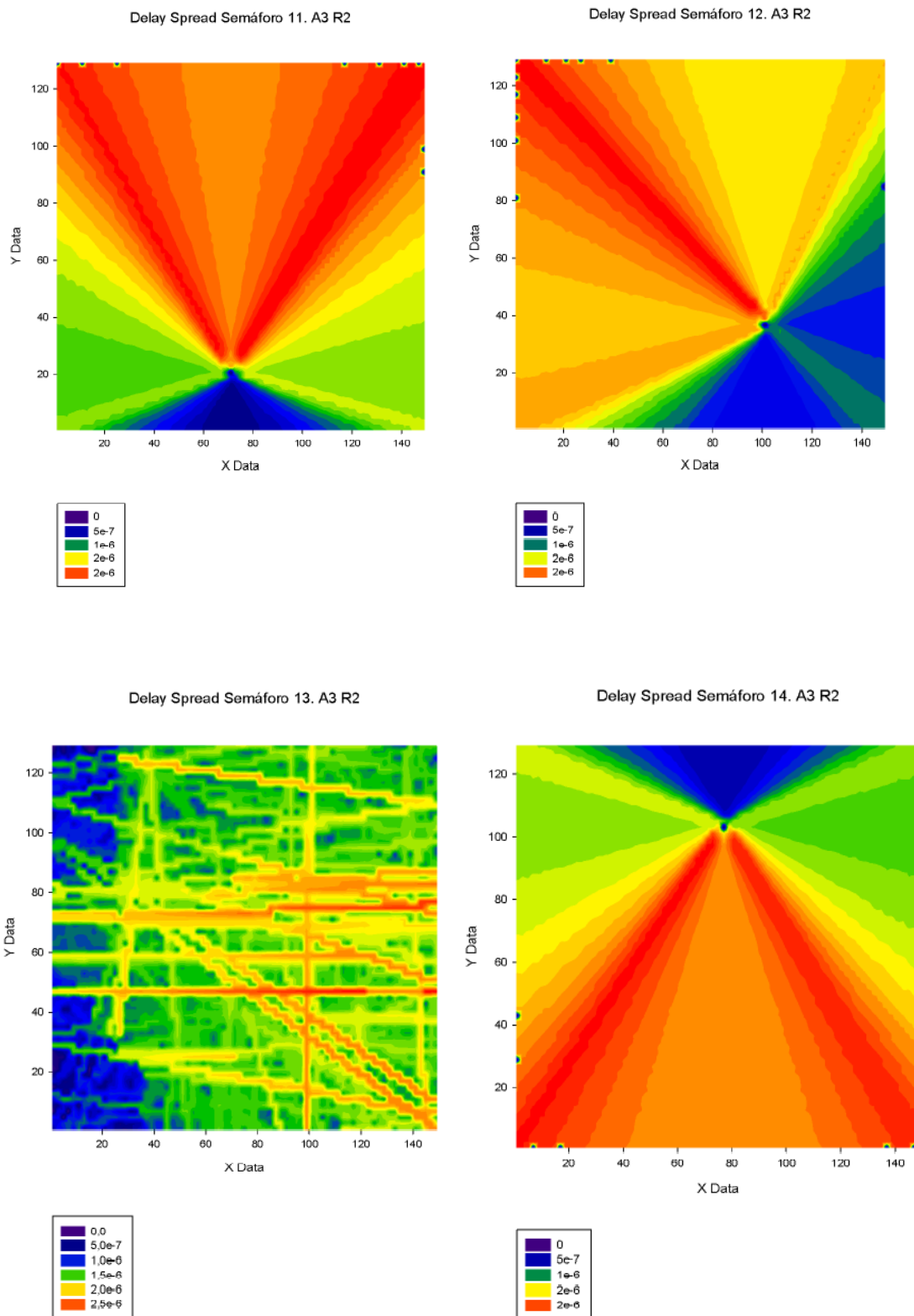


Ilustración 50: Delay Spread obtenido en semáforos 11, 12, 13 y 14 a altura de 4 a 6 metros.

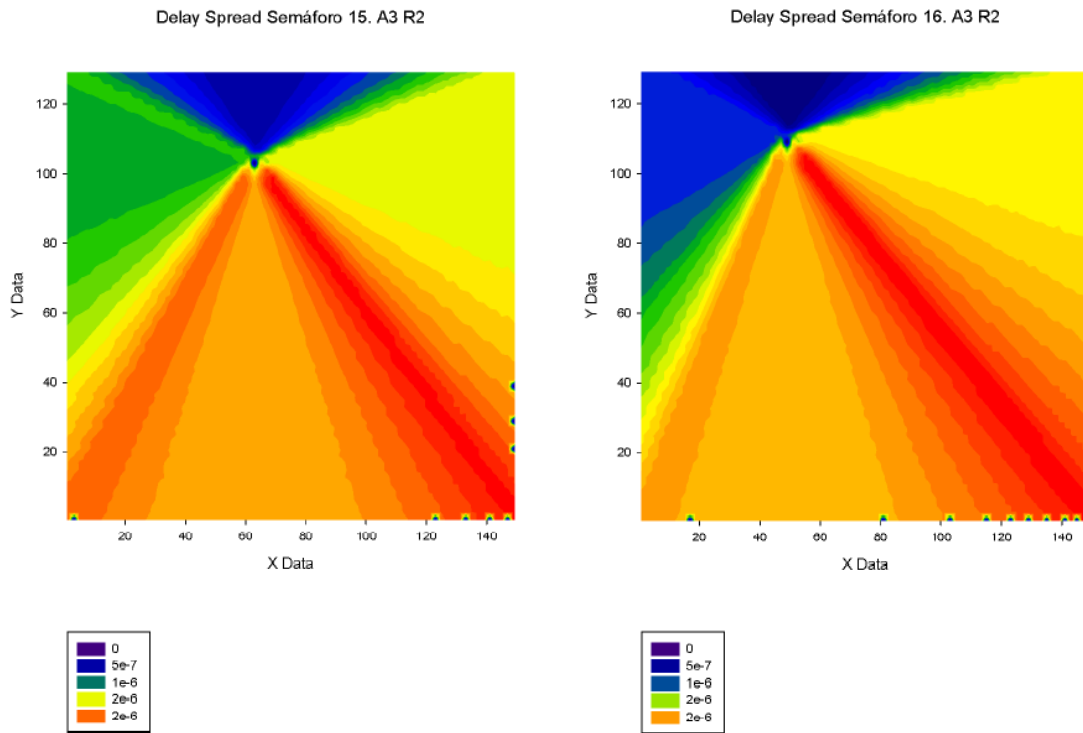


Ilustración 51: Delay Spread en semáforo 15 y 16 a altura de 4 a 6 metros.

4.3.5 Valores de perfil Retardo de potencia.

El perfil de retardo de potencia se ha obtenido de la simulación con la antena transmisora en el semáforo 1. A partir de estos datos, se ha obtenido y representado el tiempo y la potencia de los diferentes rayos que alcanzan los cubos en los que están ubicados el resto de semáforos, a la altura de las antenas transmisoras, y una persona y un coche a la altura en la que estarían situados.

Analizando estas gráficas podemos observar las componentes multitrayecto, y cómo para determinados cuboides el número de rayos que lo alcanzan es mucho mayor que para otros, debido a rebotes de los rayos en obstáculos. Así por ejemplo, para el semáforo 14 existen concretamente 501 componentes que atraviesan el cuboide analizado y para el semáforo 2 existen 626 componentes, mientras que por ejemplo el semáforo 5 presenta únicamente 16 componentes.

Indicar que el máximo retardo de un rayo recibido, y emitido por el semáforo 1, se recibe en el semáforo 4 y 13, llegando a casi 2.5×10^{-6} segundos, mientras que el mínimo se recibe en el semáforo 2, seguido del 14, 15 y 16 donde el valor máximo llega a ser inferior a 10^{-6} segundos en el primer caso, y algo superior en el resto. El resto de resultados para el resto de personas, incluidos coches y personas se ubica entre ese rango de valores.

A continuación se ofrecen las gráficas obtenidas.

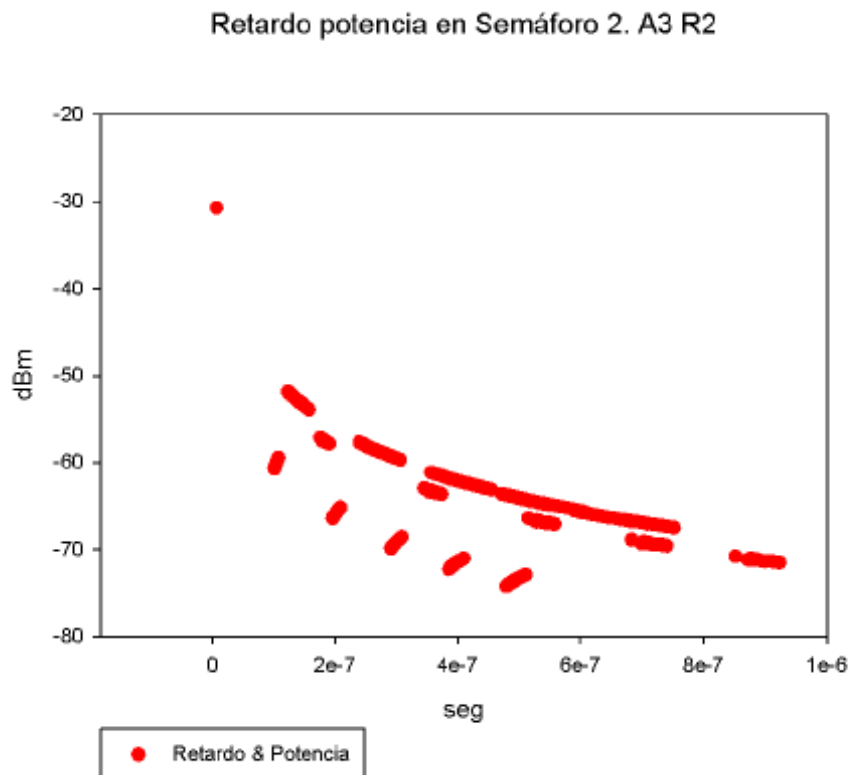


Ilustración 52: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 2.

Retardo potencia en Semáforo 3. A3 R2

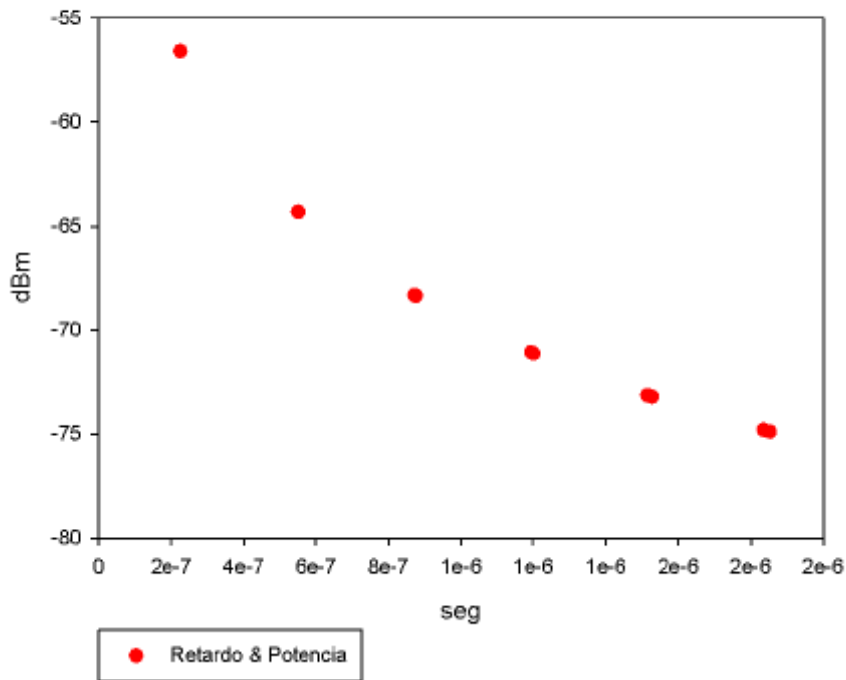


Ilustración 53: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 3.

Retardo potencia en Semáforo 4. A3 R2

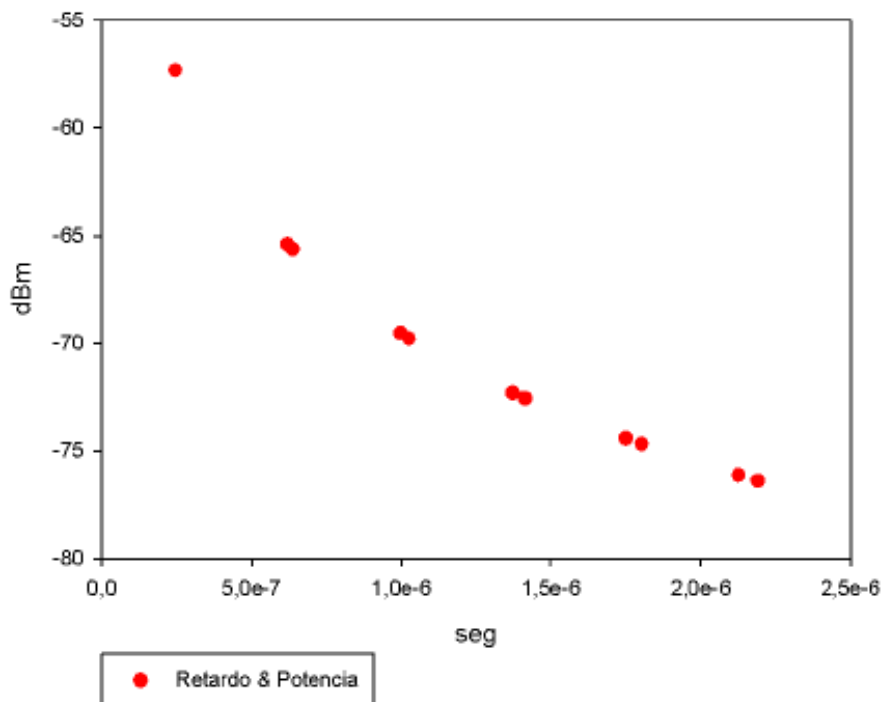


Ilustración 54: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 4.

Retardo potencia en Semáforo 5. A3 R2

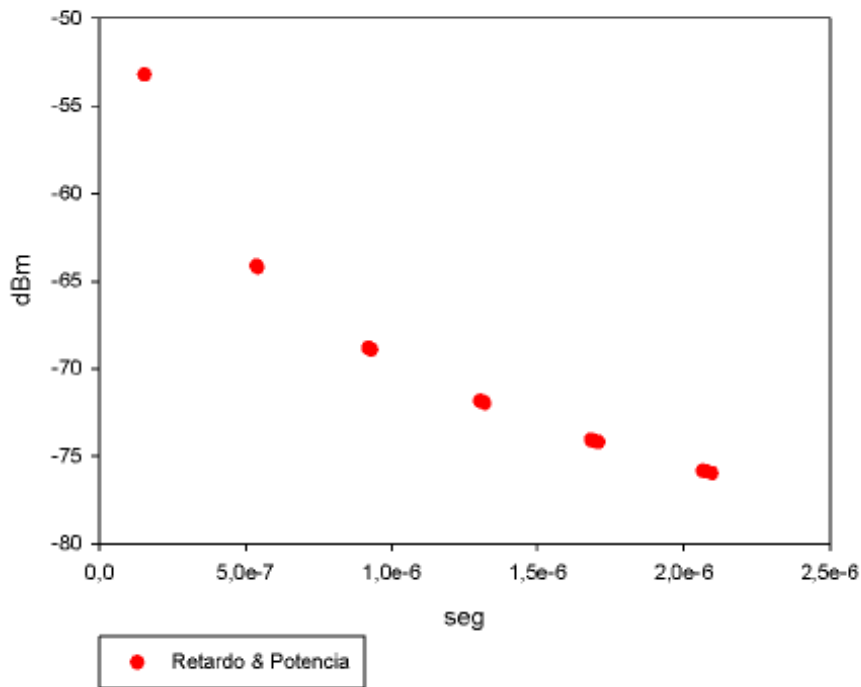


Ilustración 55: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 5.

Retardo potencia en Semáforo 6. A3 R2

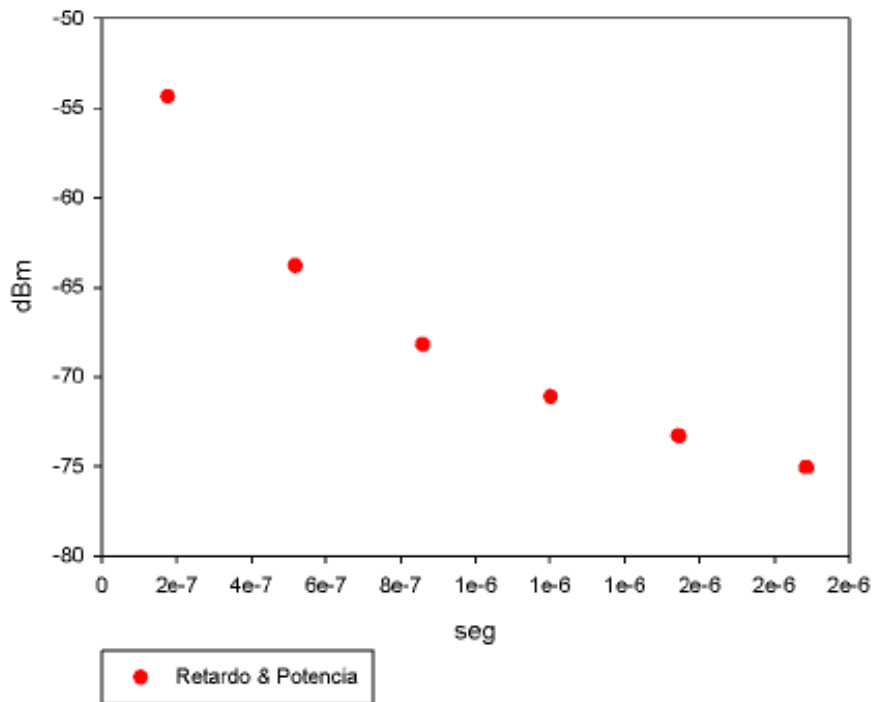


Ilustración 56: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 6.

Retardo potencia en Semáforo 7. A3 R2

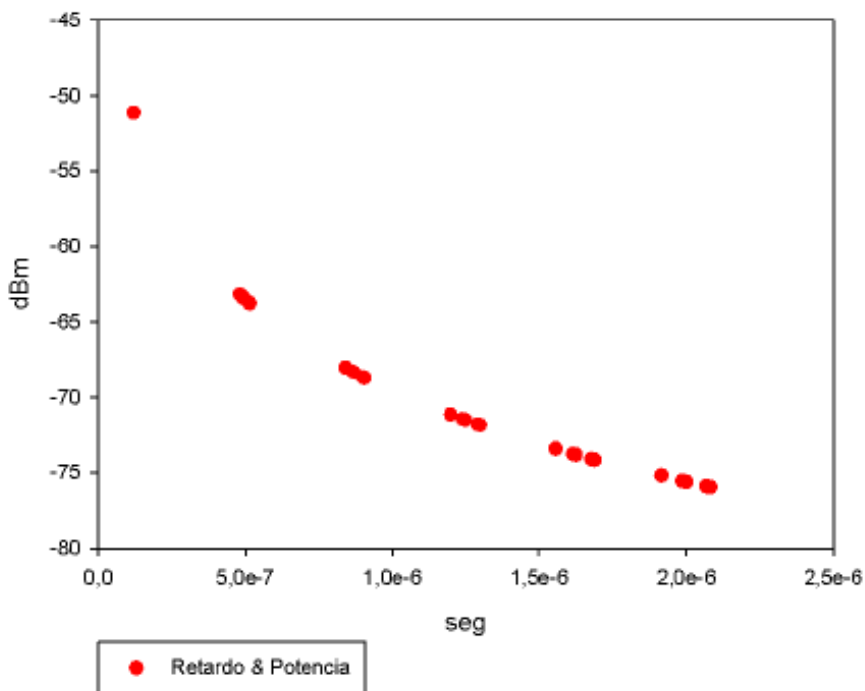


Ilustración 57: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 7.

Retardo potencia en Semáforo 8. A3 R2

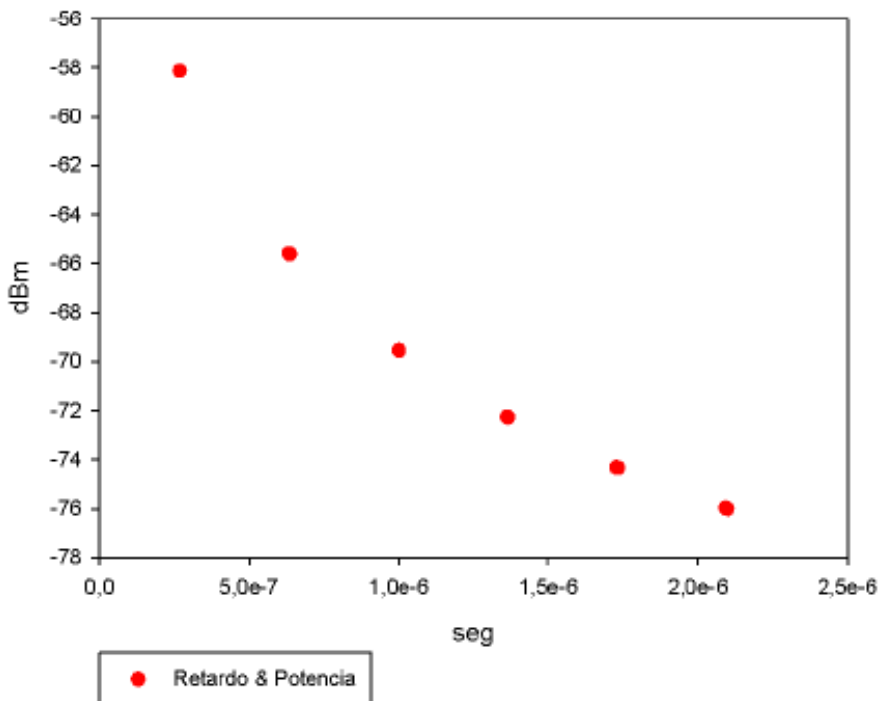


Ilustración 58: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 8.

Retardo potencia en Semáforo 9. A3 R2

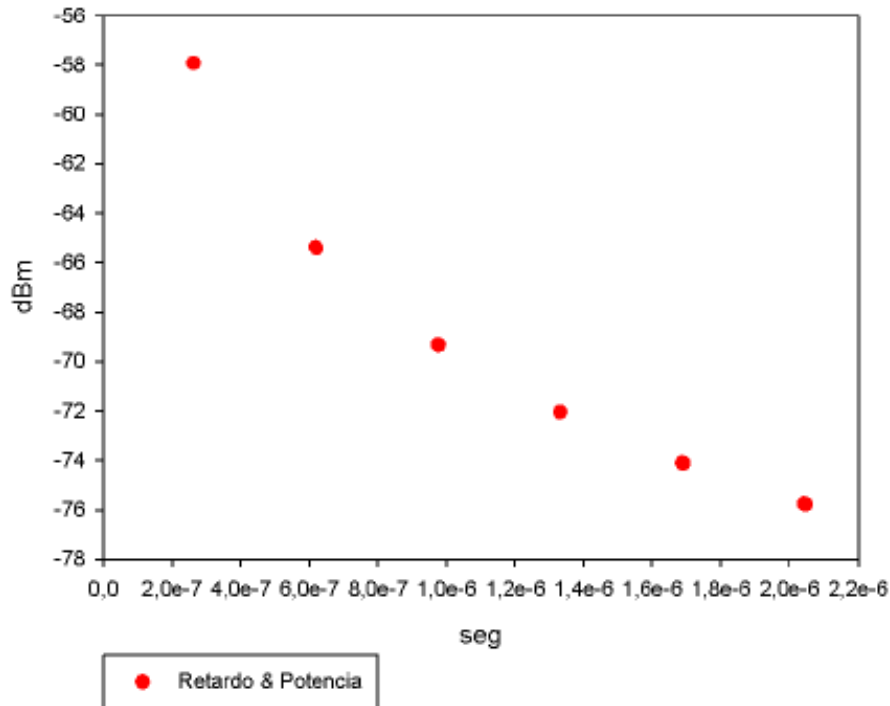


Ilustración 59: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 9.

Retardo potencia en Semáforo 10. A3 R2

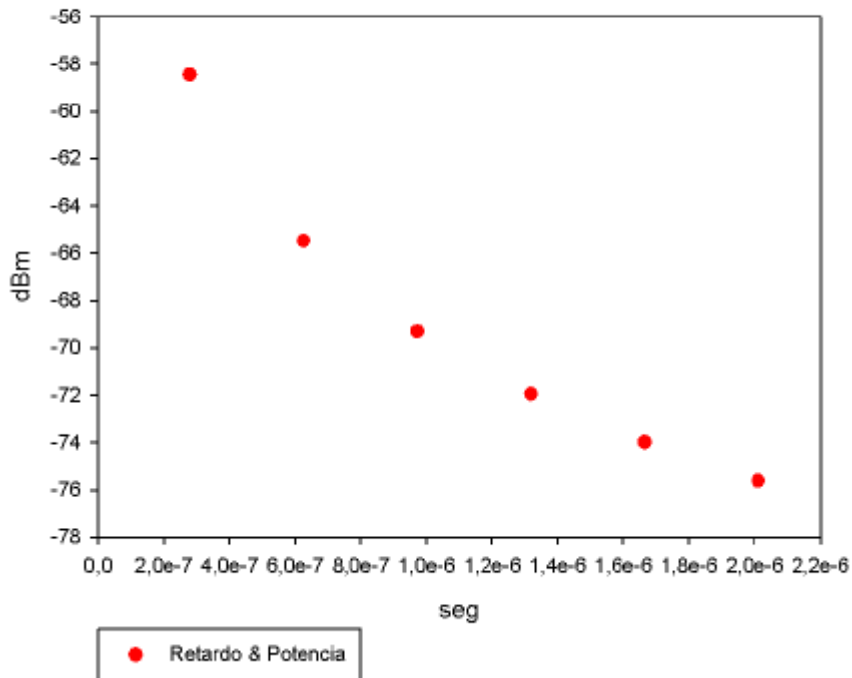


Ilustración 60: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 10.

Retardo potencia en Semáforo 11. A3 R2

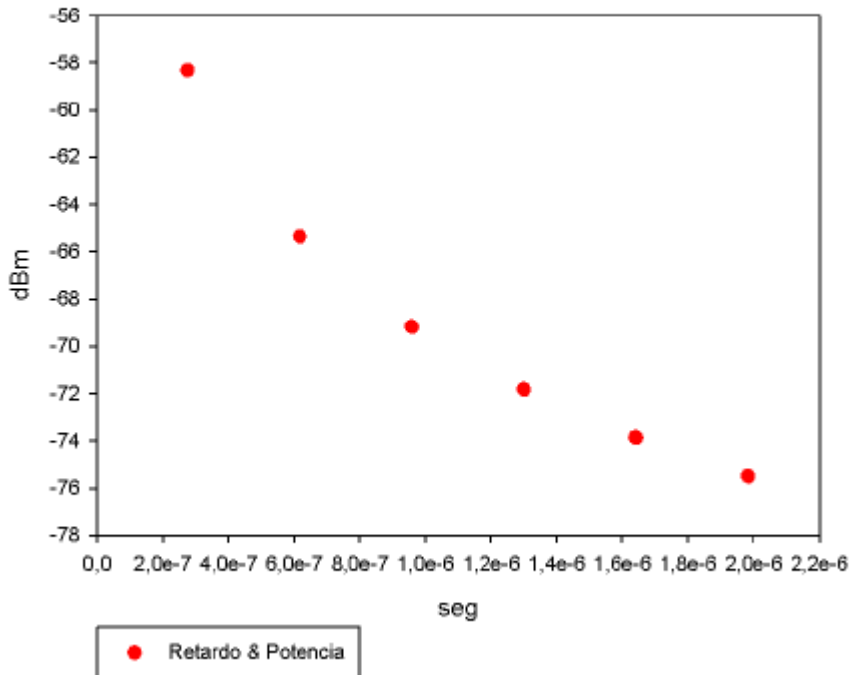


Ilustración 61: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 11.

Retardo potencia en Semáforo 12. A3 R2

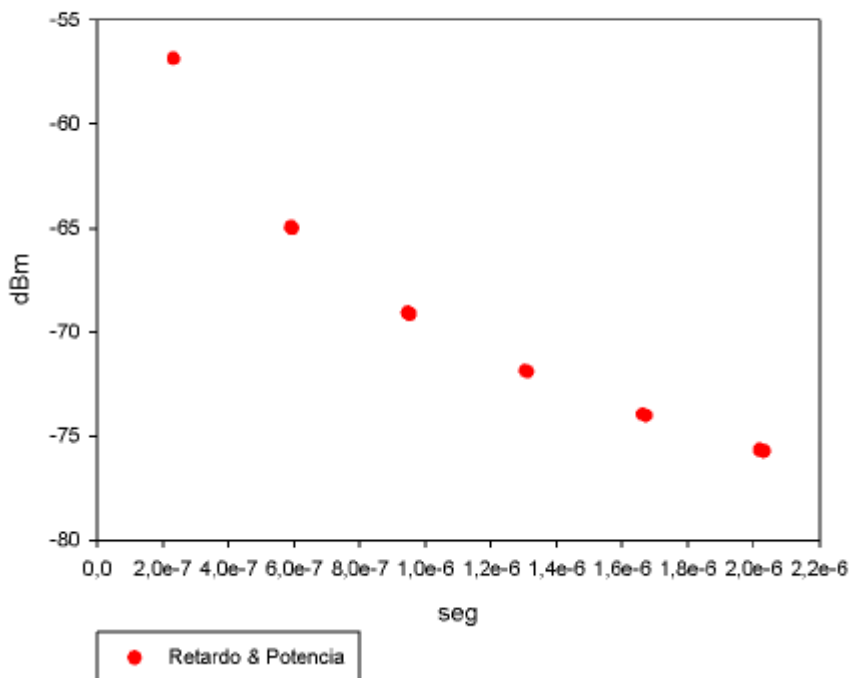


Ilustración 62: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 12.

Retardo potencia en Semáforo 13. A3 R2

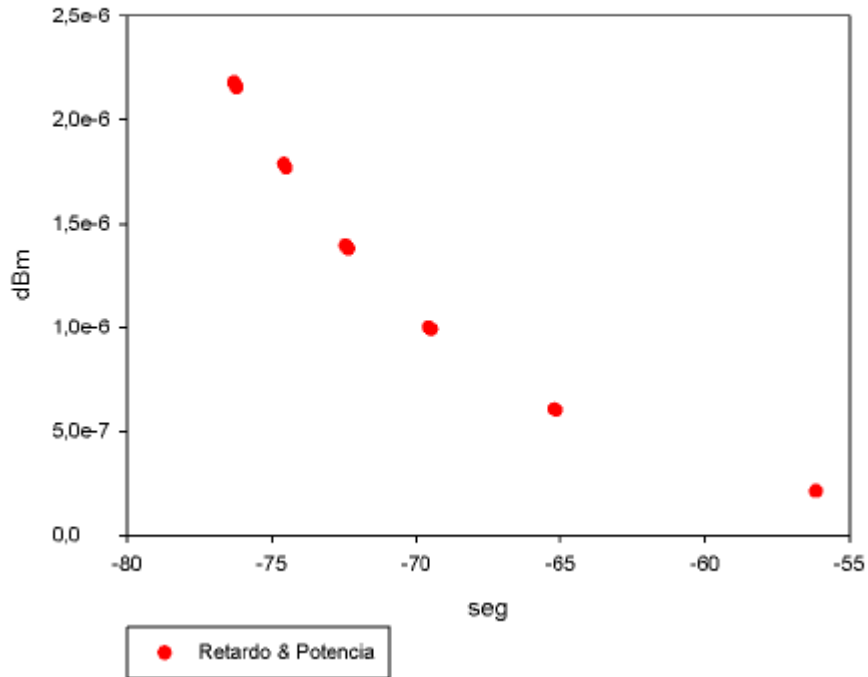


Ilustración 63: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 13.

Retardo potencia en Semáforo 14. A3 R2

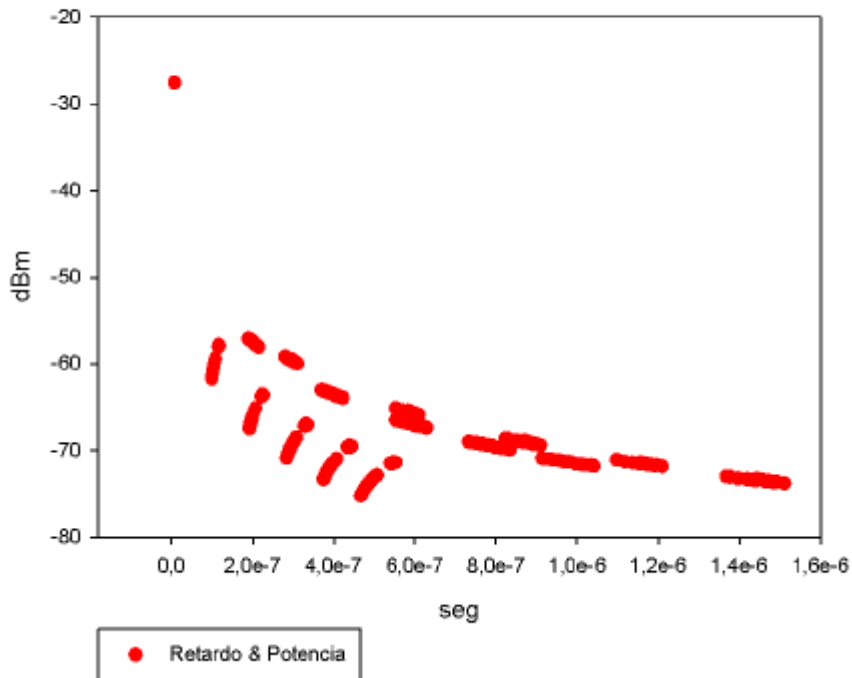


Ilustración 64: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 14.

Retardo potencia en Semáforo 15. A3 R2

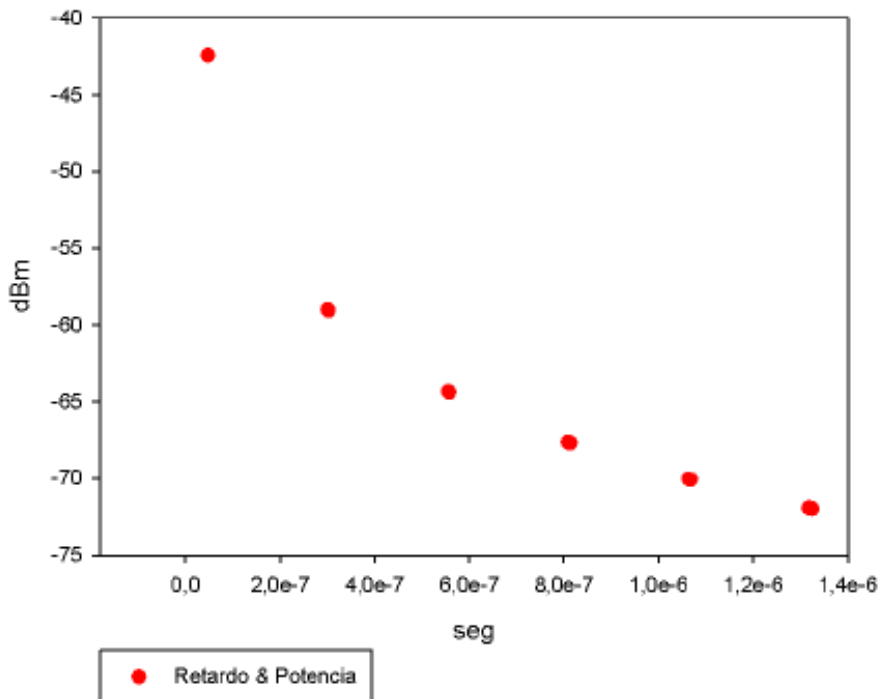


Ilustración 65: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 15.

Retardo potencia en Semáforo 16. A3 R2

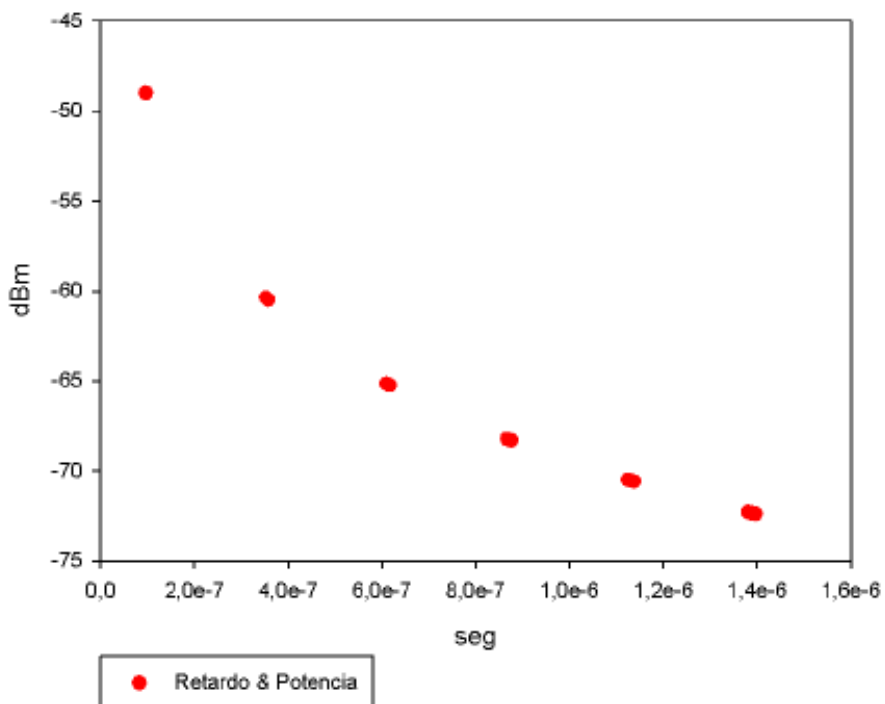


Ilustración 66: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 16.

Retardo potencia en Persona 3. A2 R2

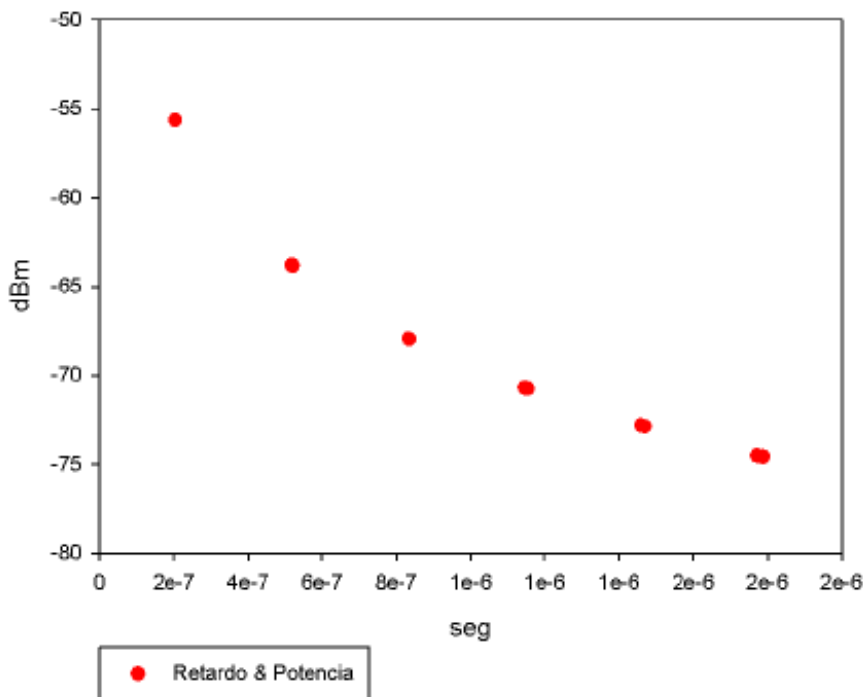


Ilustración 67: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a persona 3.

Retardo potencia en coche 14. A2 R2

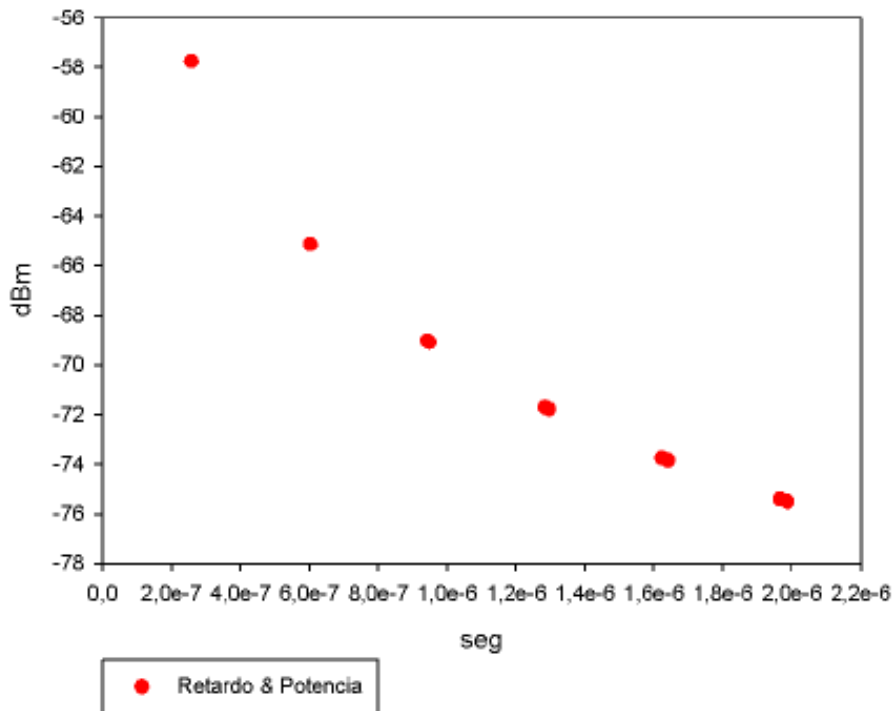


Ilustración 68: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a coche 14.

4.3.6 Radiales de potencia.

En este apartado, representaremos los valores de potencia en uno de los ejes, manteniendo fijo otro de ellos, para ver cómo varía la potencia debido a reflexiones y componentes multitrayecto a lo largo de un eje.

Estas representaciones las realizaremos para una de las simulaciones, la del semáforo uno, y a la altura del cuboide 2 en la simulación a resolución 2, que comprenderá de 2 a 4 metros, y será donde queden ubicadas las personas y vehículos.

Se han tomado varios radiales que comprenderán la zona de tránsito de vehículos (radiales verdes 1, 2, 3, 4) y otros dos que comprenderán la zona de tránsito de peatones (radiales naranjas 5 y 6).

A continuación se representan los ejes a analizar:

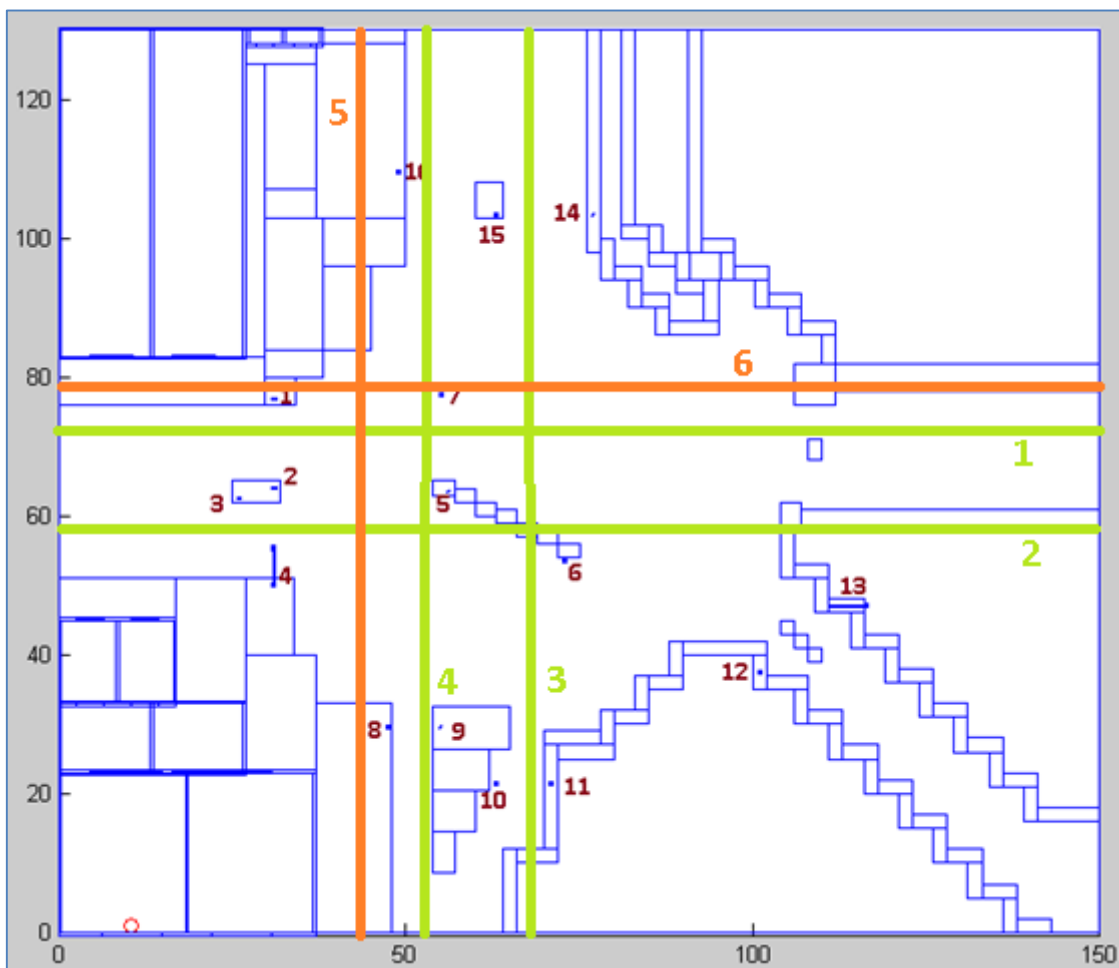


Ilustración 69: Ejes propuestos para radiales de potencia.

Radial de potencia para X=43. A2 R2

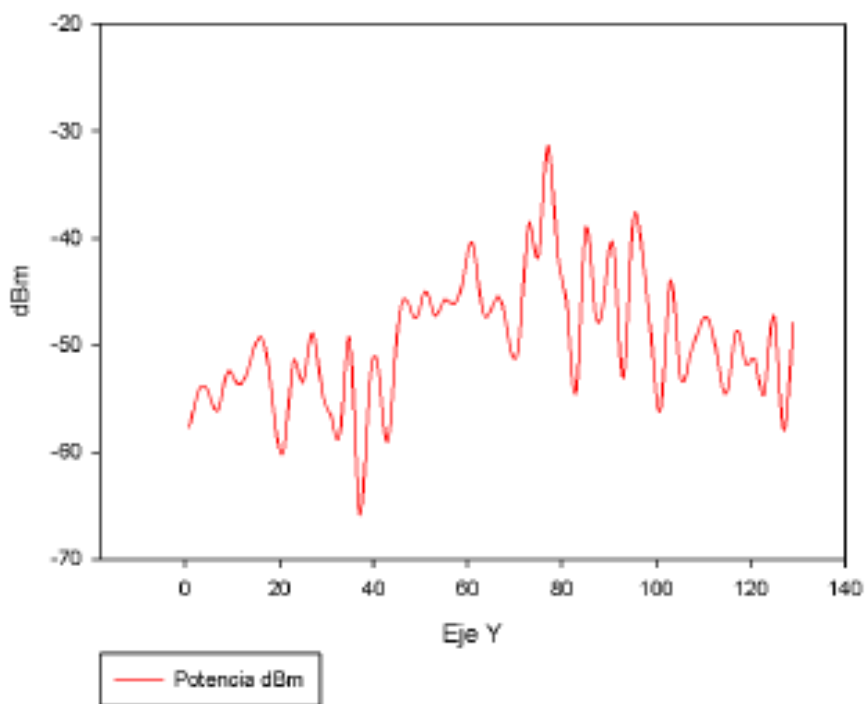


Ilustración 70: Radial número 5: Potencia en función del eje Y.

Radial de potencia para X=52. A2 R2

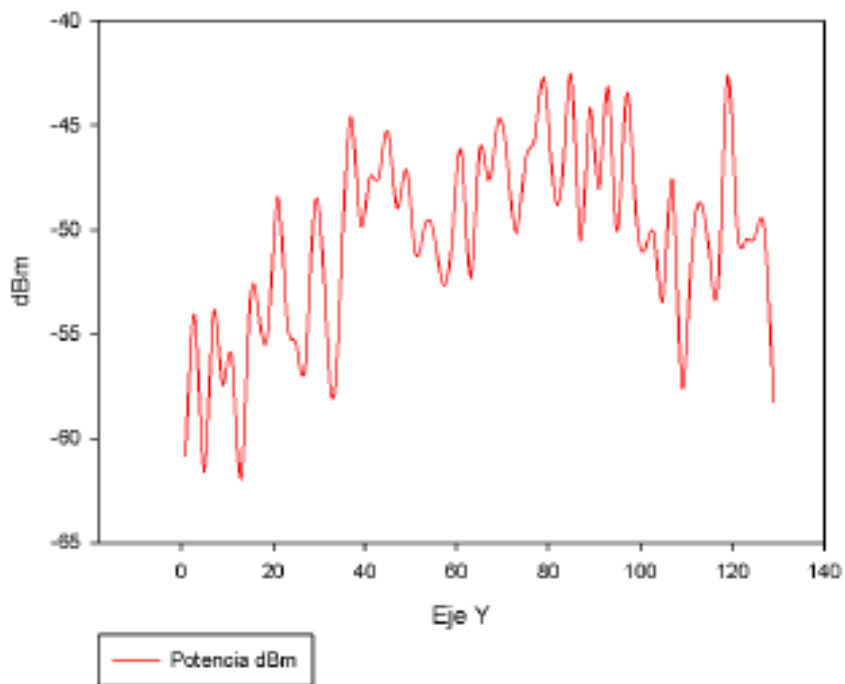


Ilustración 71: Radial número 4: Potencia en función del eje Y.

Radial de potencia para X=68 . A2 R2

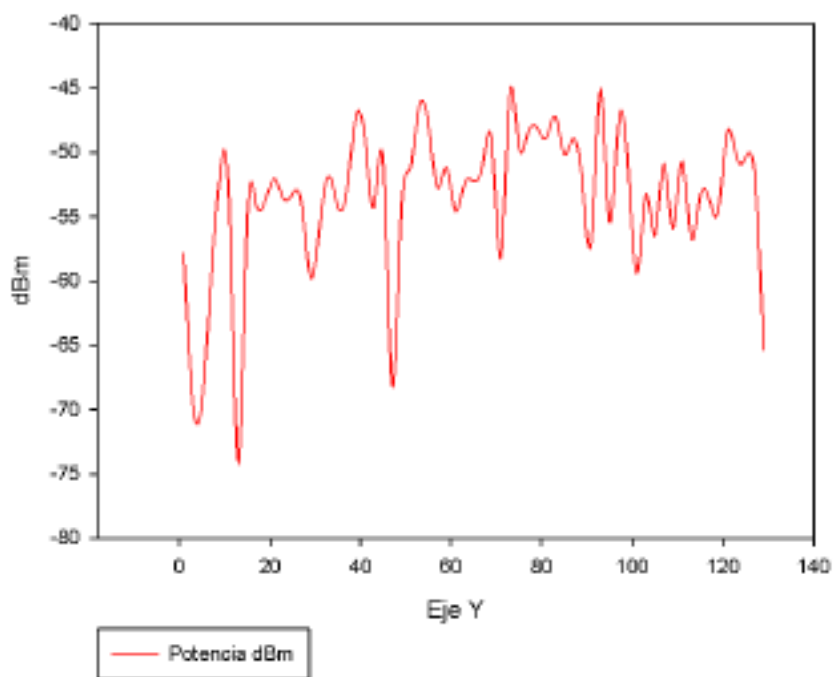


Ilustración 72: Radial número 3: Potencia en función del eje Y.

Radial de potencia para Y=58. A2 R2

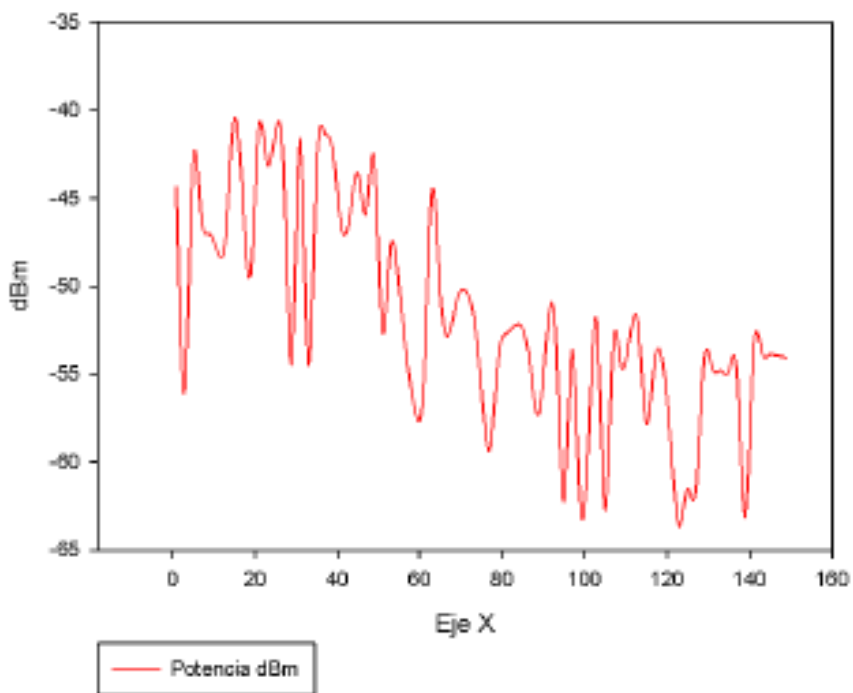


Ilustración 73: Radial número 2: Potencia en función del eje X.

Radial de potencia para Y=72. A2 R2

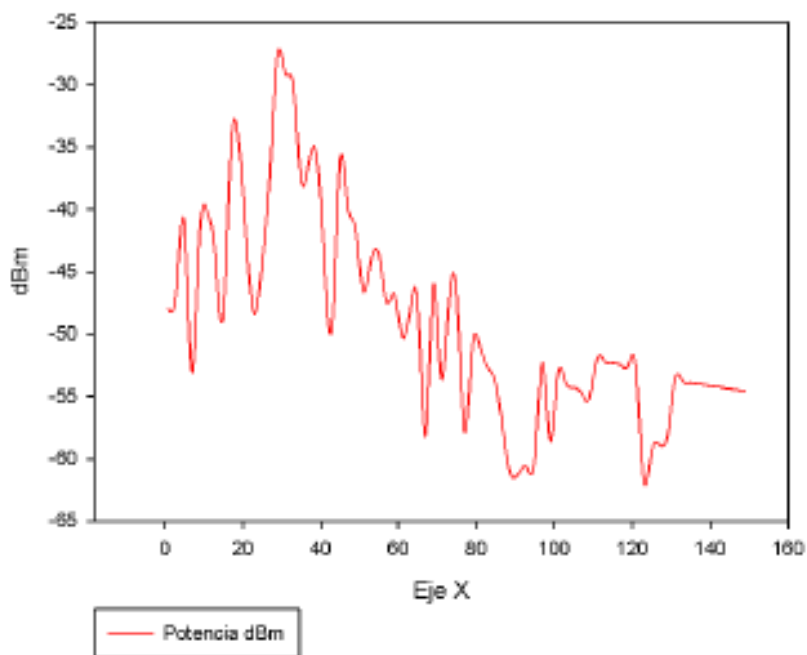


Ilustración 74: Radial número 1: Potencia en función del eje X.

Radial de potencia para Y=80. A2 R2

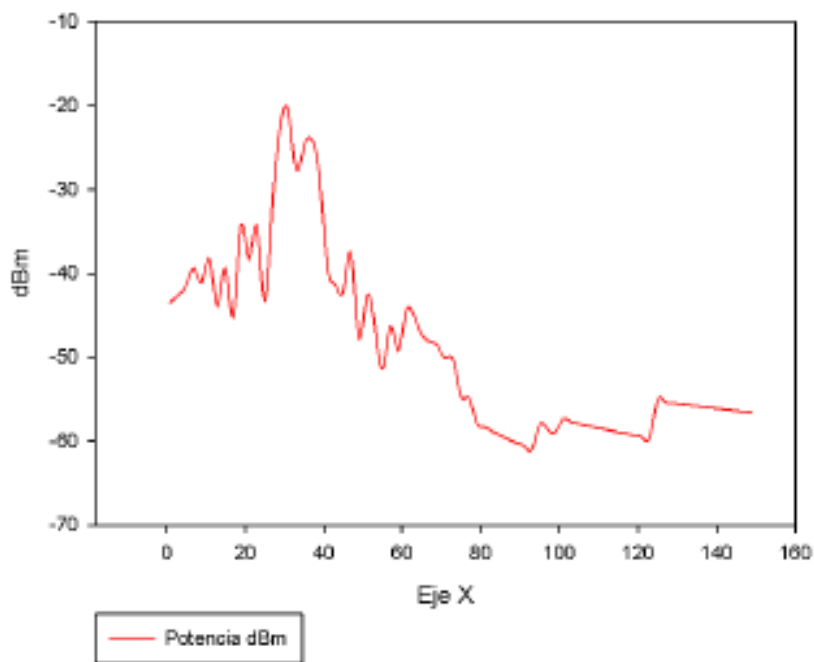


Ilustración 75: Radial número 6: Potencia en función del eje X.

4.3.7 Análisis de resultados.

En primer lugar, y analizando los resultados obtenidos en cuanto a potencia, podemos ver cómo es posible realizar una red de sensores inalámbricos utilizando la tecnología ZigBee para la interconexión de semáforos.

Para ello nos basamos en dos de los receptores más comúnmente utilizados, de la familia DIGI RF anteriormente conocida como Maxstream:

- **XBee ZB:** sensibilidad de -97 dBm y potencia de transmisión de +3 dBm, que puede operar hasta 40 metros en espacios urbanos.



Ilustración 76: Módulo XBee ZB de DIGI RF.

- **XBee Pro ZB:** sensibilidad de -102 dBm y potencia de transmisión de +17 dBm, que puede operar hasta más de 120 metros en espacios urbanos [28].

En este escenario, son motas XBee ZB según los datos de alcance del fabricante seríamos capaces de poder comunicar cada semáforo con los semáforos más cercanos, hasta 5 o 6 dependiendo de la ubicación, de tal forma, que alguno de ellos siempre estaría disponible para transmitir la información.

Con motas XBee Pro ZB sin embargo, podríamos comunicar desde un semáforo con el resto de ellos según indica el fabricante, sin necesidad de realizar un camino anidado que aun así sería posible.

A continuación, analizaremos para la simulación del semáforo 1 el radial de potencia más favorable en la posición X=31 del semáforo, y el más desfavorable en X=132 al borde del escenario, para realizar un balance de enlace y estudiar la viabilidad y el rango de cobertura de las motas XBee ZB y XBee Pro ZB.

En nuestra simulación, hemos utilizado antenas con potencia de transmisión de 0 dBm, sin embargo, según las especificaciones del fabricante, las motas XBee y Xbee Pro emiten +3 y +17 dBm respectivamente, por lo que a la potencia obtenida en la simulación habría que sumarle ese valor para obtener el valor real que proporcionarían las motas.

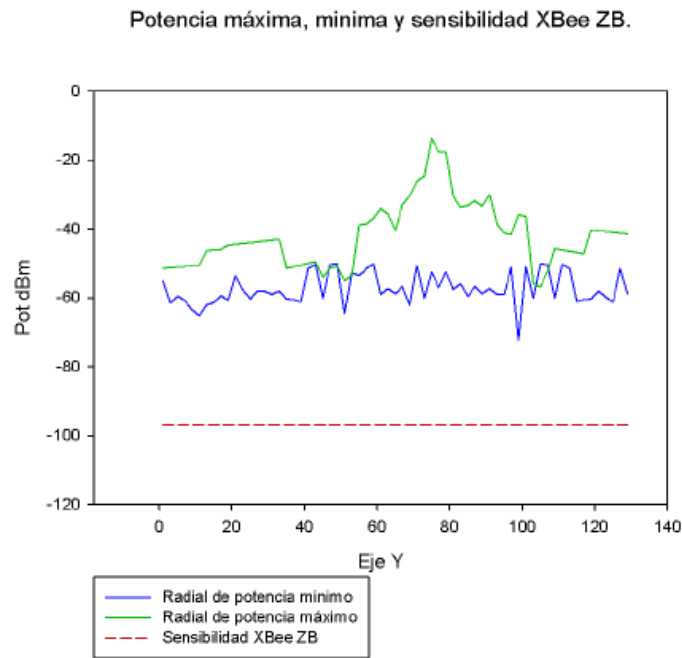


Ilustración 77: Radial de potencia máx, mínima y sensibilidad con motas XBee ZB en dBm.

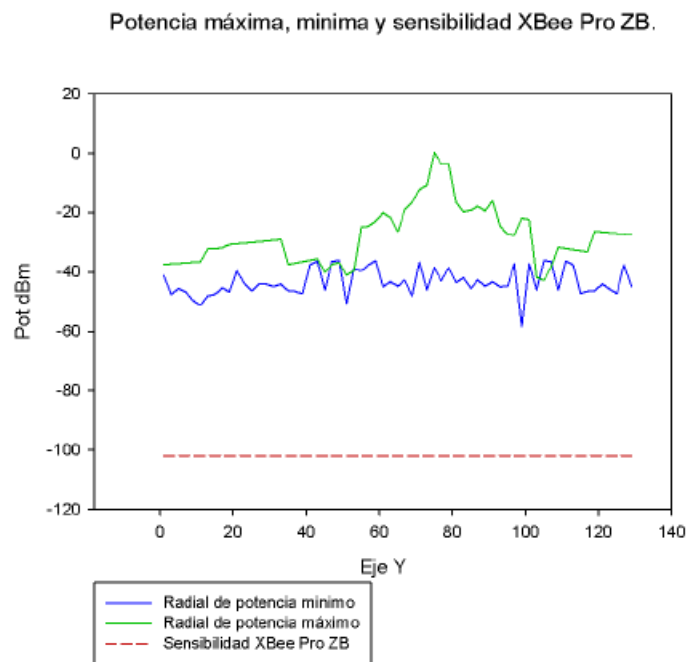


Ilustración 78: Radial de potencia máx, mínima y sensibilidad con motas XBee Pro ZB en dBm.

Además y puesto que la sensibilidad de estas motas es de -97 y -102 dBm según los radiales de potencia, en todo momento la sensibilidad es inferior a la potencia recibida, por lo que serían aptas para comunicar prácticamente con todos los semáforos. Hay que

tener en cuenta, que las motas están ubicadas sobre los semáforos, por lo que tendrán pocos obstáculos en su trayecto, y a que esta simulación se ha realizado sin personas ni coches que harían reducir la potencia captada por los receptores.

Si analizamos los resultados para la tecnología Bluetooth, según las especificaciones del fabricante sería preciso la utilización de dispositivos de Clase I que emitan 100mW o 20 dBm de potencia, y con un alcance aproximado de más de 30 metros o dispositivos de Clase II, que sería suficiente para la interconexión de un semáforo con varios de los situados en sus inmediaciones para el escenario planteado, sin embargo aquí tiene en cuenta los posibles obstáculos que se ubiquen en el escenario, mientras que nosotros tendremos prácticamente visión directa en la simulación.

- **Guangzhou HC 06** es un módulo de Bluetooth de Guangzhou HC Information Technology que presenta una sensibilidad de -80 dBm, y una potencia de transmisión máxima de + 6 dBm, que sería suficiente para formar una piconet entre los módulos Bluetooth de los semáforos.

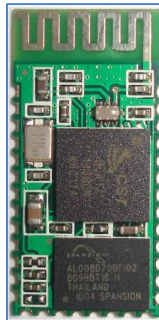


Ilustración 79: Módulo Bluetooth HC 06 de Guangzhou.

Realizando el mismo procedimiento que antes, hemos sumado 6dBms a la potencia de los radiales anteriores, y también se sitúa en todo momento por encima de la sensibilidad del receptor, que son -80 dBm:

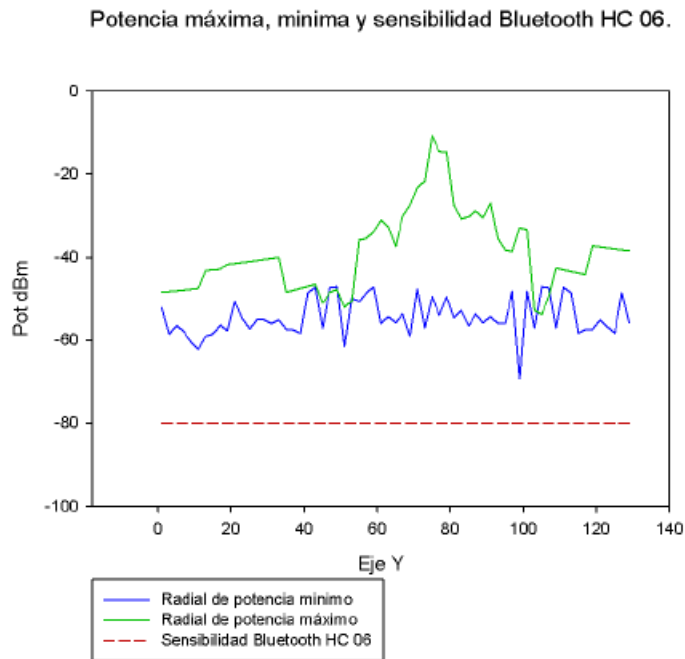


Ilustración 80: Radial de potencia máx, mínima y sensibilidad con módulo Bluetooth HC 06 en dBm.

Una vez realizado el balance de enlace, y vista la viabilidad del sistema, vamos a comentar los posibles usos que puede tener implantar este sistema y llevarlo a la práctica:

- Como complemento a los ITS (*Intelligent Transportation Systems*): puede servir para la transmisión de información de tráfico, conteo de vehículos de un semáforo a otro, para dar prioridades a vehículos de policía o ambulancias equipados con un módulo ZigBee o Bluetooth, y recuperación de vehículos robados. También podría servir para que cada semáforo indicara a los coches equipados con Bluetooth o ZigBee el tiempo de espera hasta la luz verde.
- Como un sistema de ayuda a personas discapacitadas, como puede ser el guiado de personas ciegas: realizar entre los diferentes sensores un posicionamiento al igual que realiza el sistema GPS para indicar a la persona cuándo y exactamente por dónde tiene que cruzar.
- Como una aplicación de las Smart City, para realizar conteo de personas y vehículos, además de poder conectar los semáforos a internet y poder proporcionar de esta forma acceso a internet a través de Bluetooth a los viandantes.



Ilustración 81: Posibles aplicaciones del sistema de comunicación entre semáforos.

Por otro lado, comentar que el proyecto ha sido aceptado para su presentación en la conferencia internacional “2nd International Electronic Conference on Sensors and Applications” que tendrá lugar a finales de año.



Ilustración 82: Logo conferencia ECSA Noviembre 2015.

5. CONCLUSIONES

Las simulaciones llevadas a cabo en el proyecto se han basado en la banda frecuencial ISM de 2.4 GHz, con el objetivo de estudiar la posibilidad de implantación de una red inalámbrica basada en el estándar IEEE 802.15.4 para la comunicación entre semáforos.

Las mayores dificultades encontradas en el proyecto han sido en primer lugar la generación del escenario en Matlab, para el cuál se han invertido numerosas horas con el objetivo de asemejarlo al máximo posible a la realidad. Por otro lado, el hecho de realizar 16 simulaciones, a diferentes resoluciones, y con diferentes cambios ha implicado bastante tiempo de análisis y de preparación de los resultados.

Una vez realizado el trabajo, y analizados los resultados de las diversas simulaciones realizadas, se obtienen las siguientes conclusiones:

- Los resultados de simulación han sido obtenidos por medio de un software de lanzamiento de rayos 3D basado en Matlab e implementado en la Universidad Pública de Navarra. Por tanto, el método aquí presentado proporciona una valiosa herramienta para optimizar el despliegue de redes de dispositivos inalámbricos en ITS.
- Es difícil realizar la definición de los materiales con los parámetros de conductividad y permitividad relativa para la simulación, y que posteriormente influirán en los resultados obtenidos.
- El método RL no es adecuado para escenarios de simulación extensos debido a que los rayos divergen a una cierta distancia que depende del tamaño de los cubos de resolución, de la distancia entre rayos emitidos y del escenario de propagación.
- Cuanto mayor son los cubos, y por lo tanto menor la resolución de simulación, mayor es la distancia de divergencia, mientras que cuanto menor sea la distancia entre rayos mayor es la distancia de convergencia.
- Para que el método RL sea adecuado a la hora de simular escenarios grandes hay que mallar con mallas dinámicas. Estas mallas tendrán cubos de varios tamaños. Los cubos más pequeños se situarán próximos a la fuente e irán aumentando de tamaño conforme se alejen de la antena emisora.
- Los resultados de este estudio muestran también la fuerte dependencia de la radiopropagación a 2.4 GHz con respecto a la morfología, tamaño y características de los materiales empleados, donde la propagación multitrayecto es el fenómeno más significativo, en donde obstáculos como los troncos, copas de los árboles, semáforos, farolas... van a generar gran multitud de componentes reflejadas. Esta fuerte influencia del multitrayecto va a generar variaciones de medida relativamente elevadas en los distintos puntos del escenario.
- Finalmente, y a la vista de los resultados sería viable la implantación de una red de sensores inalámbrica basada en ZigBee o Bluetooth en este entorno, trabajando

a 2.4GHz. Así, podrá evitarse cualquier sistema cableado y el coste económico de obra civil que implica.

6. LÍNEAS FUTURAS

- Uno de los puntos que no se ha podido realizar, ha sido la simulación del mismo escenario repleto de coches y personas, para analizar la influencia de éstos en la señal radioeléctrica, y en la potencia que finalmente llega a los receptores.
- Se redactará un artículo científico, una vez se obtengan los resultados comentados previamente de simulaciones con personas y vehículos, para su presentación en la conferencia internacional ECSCA “*2nd International Electronic Conference on Sensors and Applications*” que tendrá lugar en noviembre de 2015.
- Otro aspecto interesante sería medir en el escenario de simulación, colocando transmisores de las características comentadas y analizar los resultados obtenidos, comparándolos con los extraídos de las simulaciones, para comparar cómo se ajusta el modelo a la realidad en este tipo de entorno urbano.
- Por otro lado, tener en cuenta la movilidad de los vehículos, para poder realizar la comunicación de éstos con los semáforos, para por ejemplo que los policías, bomberos y ambulancias estando en modo “urgencia” hagan que los semáforos que demandan se pongan en verde y en rojo el resto etc.
- Además sería interesante analizar el efecto de interferencia en un entorno con múltiples sistemas inalámbricos en funcionamiento, como Bluetooth de peatones y conductores, WLANs WiFi de los edificios cercanos...
- Podrían realizarse varias aplicaciones de nivel superior partiendo de la información que intercambien los semáforos mediante la red de sensores, y anteriormente propuestas.

7. REFERENCIAS

7.1 BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Abd-Fatah, A. Y., Yusuff, R. M., Aziz, F. A., & Zulkifli, N. (2011, 27-29 May 2011). *Simulation of time-based versus sensor-based traffic light system*. Paper presented at the Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on.
- [2] Tubaishat, M., Yi, S., & Hongchi, S. (2007, Jan. 2007). *Adaptive Traffic Light Control with Wireless Sensor Networks*. Paper presented at the Consumer Communications and Networking Conference, 2007. CCNC 2007. 4th IEEE.
- [3] Fuqiang, Z., Bo, Y., & Yitao, C. (2009, 16-19 Aug. 2009). *Traffic light control for a single intersection based on wireless sensor network*. Paper presented at the Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI '09. 9th International Conference on.
- [4] Binbin, Z., Jiannong, C., Xiaoqin, Z., & Hejun, W. (2010, 6-9 Sept. 2010). *Adaptive Traffic Light Control in Wireless Sensor Network-Based Intelligent Transportation System*. Paper presented at the Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd.
- [5] Tubaishat, M., Qi, Q., Yi, S., & Hongchi, S. (2008, 10-12 Jan. 2008). *Wireless Sensor-Based Traffic Light Control*. Paper presented at the Consumer Communications and Networking Conference, 2008. CCNC 2008. 5th IEEE.
- [6] Komguem, R. D., Stanica, R., Tchuenta, M., & Valois, F. (2014, 8-11 Oct. 2014). *WARIM: Wireless Sensor Networks Architecture for a Reliable Intersection Monitoring*. Paper presented at the Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2014 IEEE 17th International Conference on.
- [7] Baaddi, A. A., & El Ouadghiri, M. D. (2014, 28-30 May 2014). *Hybrid Wireless Sensor-based system for chaotic traffic*. Paper presented at the Next Generation Networks and Services (NGNS), 2014 Fifth International Conference on.
- [8] Wenjie, C., Lifeng, C., Zhanglong, C., & Shiliang, T. (2006, 20-24 June 2006). *WITS: A Wireless Sensor Network for Intelligent Transportation System*. Paper presented at the Computer and Computational Sciences, 2006. IMSCCS '06. First International Multi-Symposiums on.
- [9] Gradinescu, V., Gorgorin, C., Diaconescu, R., Cristea, V., & Iftode, L. (2007, 22-25 April 2007). *Adaptive Traffic Lights Using Car-to-Car Communication*. Paper presented at the Vehicular Technology Conference, 2007. VTC2007-Spring. IEEE 65th.

- [10] Al-Khateeb, K., & Johari, J. A. Y. (2008, 13-15 May 2008). *Intelligent dynamic traffic light sequence using RFID*. Paper presented at the Computer and Communication Engineering, 2008. ICCCE 2008. International Conference on.
- [11] Aissaoui, R., Menouar, H., Dhraief, A., Filali, F., Belghith, A., & Abu-Dayya, A. (2014, 10-14 June 2014). *Advanced real-time traffic monitoring system based on V2X communications*. Paper presented at the Communications (ICC), 2014 IEEE International Conference on.
- [12] Jansen, S., Hoting, D., Runge, J., Brinkhoff, T., Nicklas, D., & Sauer, J. (2014, 14-18 July 2014). *9 Million Bicycles? Extending Induction Loops with Bluetooth Sensing*. Paper presented at the Mobile Data Management (MDM), 2014 IEEE 15th International Conference on.
- [13] Sundar, R., Hebbar, S., & Golla, V. (2015). Implementing Intelligent Traffic Control System for Congestion Control, Ambulance Clearance, and Stolen Vehicle Detection. *Sensors Journal, IEEE, 15(2), 1109-1113.* doi: 10.1109/JSEN.2014.2360288
- [14] Jingmin, S., Chao, P., Qin, Z., Pengfei, D., Yu, B., & Mengjun, X. (2015, 8-10 Jan. 2015). *There is a Will, There is a Way: A New Mechanism for Traffic Control Based on VTL and VANET*. Paper presented at the High Assurance Systems Engineering (HASE), 2015 IEEE 16th International Symposium on.
- [15] Srivastava, J. R., & Sudarshan, T. S. B. (2013, 27-30 May 2013). *Intelligent traffic management with wireless sensor networks*. Paper presented at the Computer Systems and Applications (AICCSA), 2013 ACS International Conference on.
- [16] Garcia-Nieto, J., Olivera, A. C., & Alba, E. (2013). Optimal Cycle Program of Traffic Lights With Particle Swarm Optimization. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 17(6), 823-839.* doi: 10.1109/TEVC.2013.2260755
- [17] Eren, H., Pakka, H. M., AlGhamdi, A. S., & Yizuo, Y. (2013, 6-9 May 2013). *Instrumentation for safe vehicular flow in intelligent traffic control systems using wireless networks*. Paper presented at the Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013 IEEE International.
- [18] Swapnali, S., & Chilveri, P. G. (2014, 13-14 Feb. 2014). *Hand Gesture Recognition using accelerometer sensor for traffic light control system*. Paper presented at the Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014 International Conference on.
- [19] <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>.
- [20] P. Tarrío Alonso, "Redes de sensores, Fundamentos y aplicaciones, Madrid 2008".
- [21] www.ieee802.org/15/.
- [22] <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/4987/1/memoria.pdf>.

- [23] <http://www.element14.com/community/servlet/JiveServlet/previewBody/37177-102-1-219424/Introduction%20to%20Zigbee%20Technology.pdf>.
- [24] <http://www.stonestreetone.com/PDF/IntroductiontoBluetooth.pdf>.
- [25] http://www.bluetooth.com_
- [26] <http://lms.uni-mb.si/~meolic/ptk-seminarske/bt.pdf>.
- [27] http://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/1109/7/Informe_ZigBee.pdf
- [28] <http://www.adafruit.com/datasheets/XBee%20ZB%20User%20Manual.pdf>

7.2 INDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1: VANET.....	9
Ilustración 2: Componentes de las motas.....	14
Ilustración 3: Aplicaciones de ZigBee.....	17
Ilustración 4: Topologías de ZigBee.....	18
Ilustración 5: ZigBee en modelo OSI.....	20
Ilustración 6: Capas y subcapas de la pila de protocolos en ZigBee.....	21
Ilustración 7: Ejemplo de red de sensores ZigBee.....	23
Ilustración 8: Origen del logo de Bluetooth.....	24
Ilustración 9: Clases de Bluetooth en función de la potencia transmitida.....	25
Ilustración 10: Piconets en Bluetooth.....	26
Ilustración 11: Pila de protocolos en Bluetooth.....	27
Ilustración 12: SNR Y BER en ZigBee y Bluetooth.....	30
Ilustración 13: Vista satélite del escenario de simulación.....	31
Ilustración 14: Escenario generado en Matlab sin tráfico.....	33
Ilustración 15: Escenario generado en Matlab con tráfico peatonal y vehicular.....	33
Ilustración 16: Obstáculos generados en Matlab para reproducir el escenario.....	34
Ilustración 17: Ubicación e identificación de los semáforos.....	36
Ilustración 18: Vista general 1 del escenario en Blender.....	37
Ilustración 19: Vista general 2 del escenario en Blender.....	38
Ilustración 20: Vista general 3 del escenario en Blender.....	38
Ilustración 21: Vista ampliada 1 del escenario en Blender.....	39
Ilustración 22: Vista ampliada 2 del escenario en Blender.....	39
Ilustración 23: Vista ampliada 3 del escenario en Blender.....	40
Ilustración 24: Ubicación de las antenas transmisoras en los semáforos.....	41
Ilustración 25: Escenario de análisis en Matlab.....	43
Ilustración 26: Potencia recibida con transmisor en semáforo 1 y a resolución de 1m para las tres alturas.....	44

Ilustración 27: Potencia recibida con transmisor en semáforo 1 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	45
Ilustración 28: Potencia recibida con transmisor en semáforo 2 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	46
Ilustración 29: Potencia recibida con transmisor en semáforo 3 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	47
Ilustración 30: Potencia recibida con transmisor en semáforo 4 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	48
Ilustración 31: Potencia recibida con transmisor en semáforo 5 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	49
Ilustración 32: Potencia recibida con transmisor en semáforo 6 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	50
Ilustración 33: Potencia recibida con transmisor en semáforo 7 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	51
Ilustración 34: Potencia recibida con transmisor en semáforo 8 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	52
Ilustración 35: Potencia recibida con transmisor en semáforo 9 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	53
Ilustración 36: Potencia recibida con transmisor en semáforo 10 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	54
Ilustración 37: Potencia recibida con transmisor en semáforo 11 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	55
Ilustración 38: Potencia recibida con transmisor en semáforo 12 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	56
Ilustración 39: Potencia recibida con transmisor en semáforo 13 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	57
Ilustración 40: Potencia recibida con transmisor en semáforo 14 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	58
Ilustración 41: Potencia recibida con transmisor en semáforo 15 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	59
Ilustración 42: Potencia recibida con transmisor en semáforo 16 y a resolución de 2m para las dos alturas.....	60
Ilustración 43: Plano ZY para simulación en semáforo 1 y semáforo 2	62
Ilustración 44: Plano ZY para simulación en semáforos 3, 4, 5, 6, 7, y 8.	63
Ilustración 45: Plano ZY para simulación en semáforos 9, 10, 11, 12, 13 y 14.	64
Ilustración 46: Plano ZY para simulación en semáforos 15 y 16.	65
Ilustración 47: Delay Spread semáforos 1 y 2 a altura de 4 a 6 metros.....	66
Ilustración 48: Delay Spread obtenido en semáforos 3, 4, 5, y 6 a altura de 4 a 6 metros.	67
Ilustración 49: Delay Spread en semáforos 7, 8, 9 y 10 a altura de 4 a 6 metros.	68
Ilustración 50: Delay Spread obtenido en semáforos 11, 12, 13 y 14 a altura de 4 a 6 metros.	69
Ilustración 51: Delay Spread en semáforo 15 y 16 a altura de 4 a 6 metros.	70
Ilustración 52: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 2.	71
Ilustración 53: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 3.	72
Ilustración 54: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 4.	72

Ilustración 55: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 5.	73
Ilustración 56: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 6.	73
Ilustración 57: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 7.	74
Ilustración 58: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 8.	74
Ilustración 59: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 9.	75
Ilustración 60: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 10.	75
Ilustración 61: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 11.	76
Ilustración 62: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 12.	76
Ilustración 63: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 13.	77
Ilustración 64: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 14.	77
Ilustración 65: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 15.	78
Ilustración 66: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a semáforo 16.	78
Ilustración 67: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a persona 3.	79
Ilustración 68: Retardo y potencia de los rayos desde semáforo 1 a coche 14.	79
Ilustración 69: Ejes propuestos para radiales de potencia.	80
Ilustración 70: Radial número 5: Potencia en función del eje Y.	81
Ilustración 71: Radial número 4: Potencia en función del eje Y.	81
Ilustración 72: Radial número 3: Potencia en función del eje Y.	82
Ilustración 73: Radial número 2: Potencia en función del eje X.	82
Ilustración 74: Radial número 1: Potencia en función del eje X.	83
Ilustración 75: Radial número 6: Potencia en función del eje X.	83
Ilustración 76: Módulo XBee ZB de DIGI RF.	84
Ilustración 77: Radial de potencia máx, mínima y sensibilidad con motas XBee ZB.	85
Ilustración 78: Radial de potencia máx, mínima y sensibilidad con motas XBee Pro ZB.	85
Ilustración 79: Módulo Bluetooth HC 06 de Guangzhou.	86
Ilustración 80: Radial de potencia máx, mínima y sensibilidad con módulo Bluetooth HC 06.	87
Ilustración 81: Posibles aplicaciones del sistema de comunicación entre semáforos.	88
Ilustración 82: Logo conferencia ECSA Noviembre 2015.	88

7.3 INDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Ubicación del escenario de análisis.	31
Tabla 2: Relación entre los elementos y materiales que los componen.	35
Tabla 3: Parámetros dieléctricos de los materiales.	35
Tabla 4: Posición, orientación y tipo de semáforos.	37

(Esta página se ha dejado intencionadamente en blanco)

8. ANEXOS

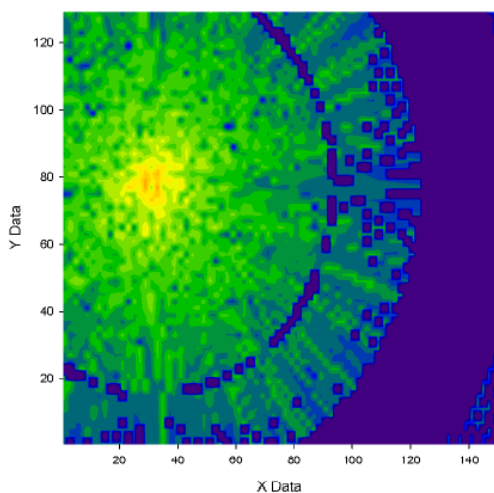
8.1 Planos de potencia XY a resolución de 1 metro.

En el siguiente anexo se ofrecen los planos de potencia para resolución de 1 metro de las 16 simulaciones, cada una de ellas con la antena transmisora en uno de los semáforos. Se ofrecerán las gráficas correspondientes a tres alturas:

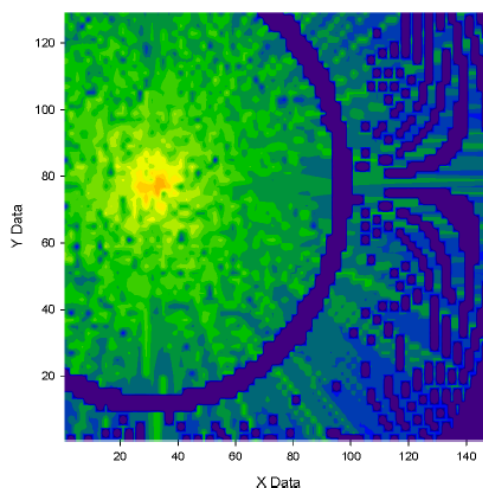
- Altura 2 (A2): de 1 a 2 metros.
- Altura 3 (A3): de 2 a 3 metros.
- Altura 4 (A4): de 3 a 4 metros.

SEMÁFORO 1:

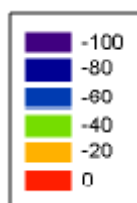
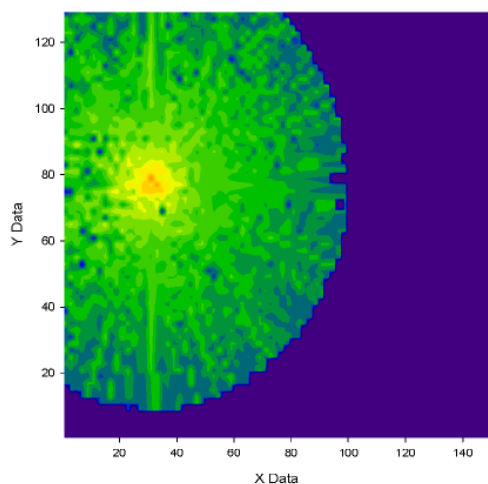
Semáforo 1. A2 R1



Semáforo 1. A3 R1

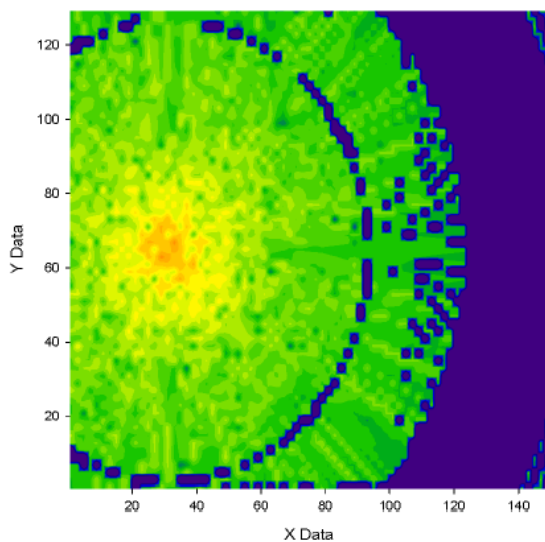


Semáforo 1. A4 R1

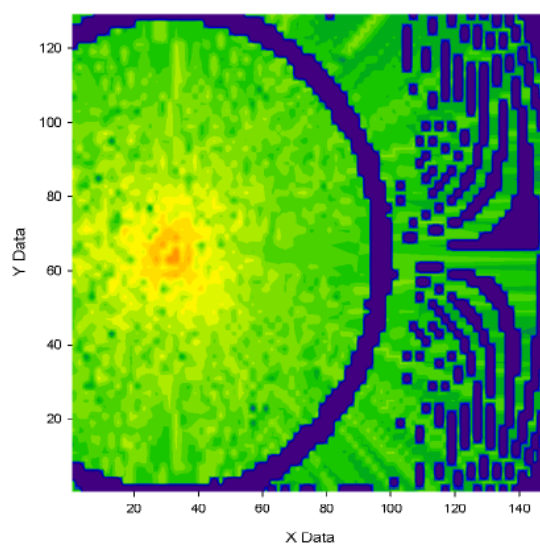


SEMÁFORO 2

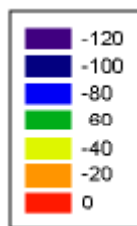
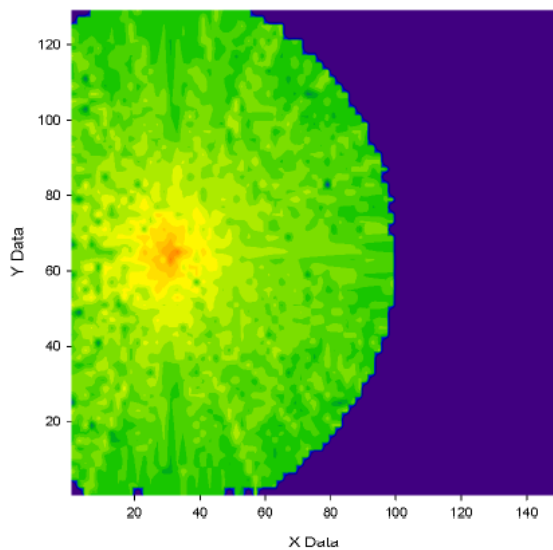
Semáforo 2. A2 R1



Semáforo 2. A3 R1

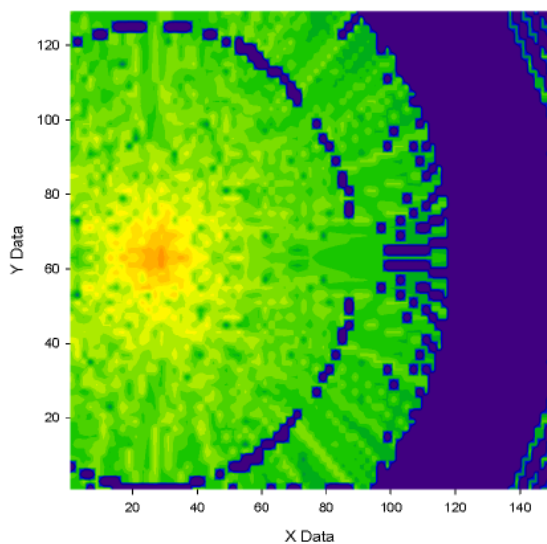


Semáforo 2. A4 R1

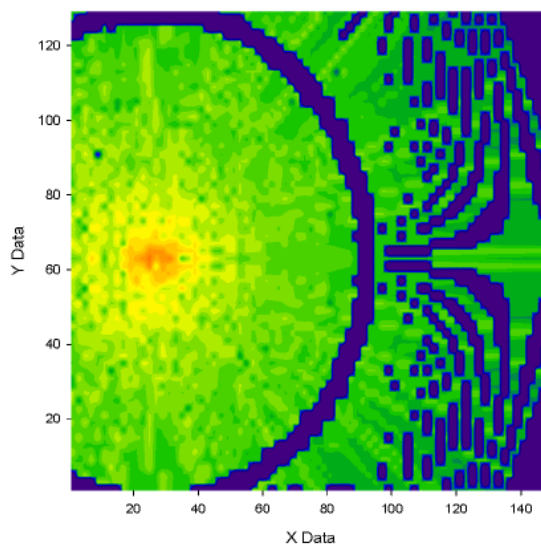


SEMÁFORO 3:

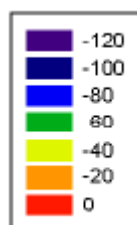
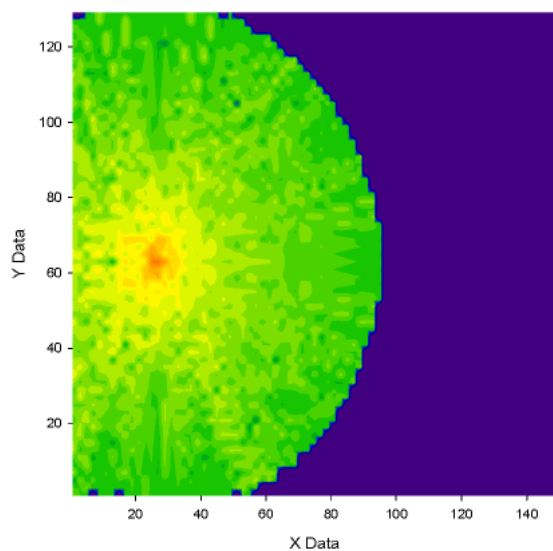
Semáforo 3. A2 R1



Semáforo 3. A3 R1

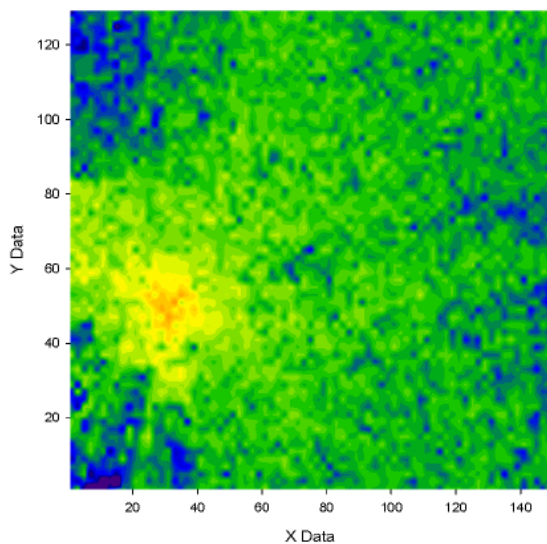


Semáforo 3. A4 R1

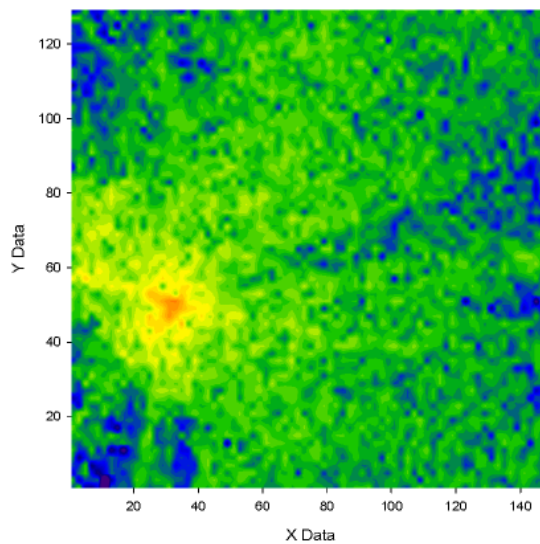


SEMÁFORO 4:

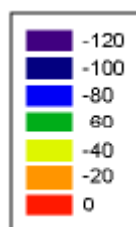
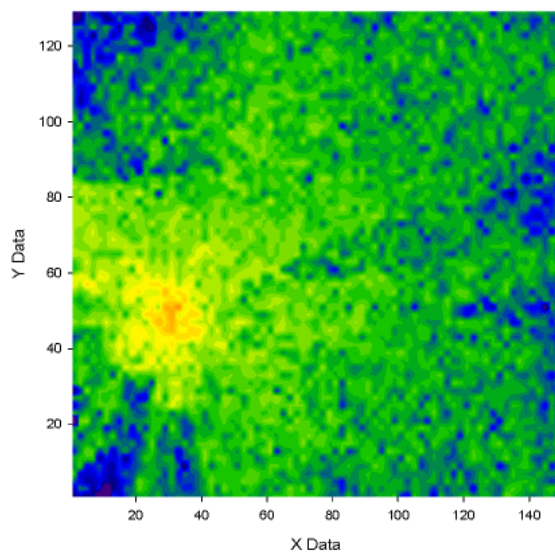
Semáforo 4. A2 R1



Semáforo 4. A3 R1

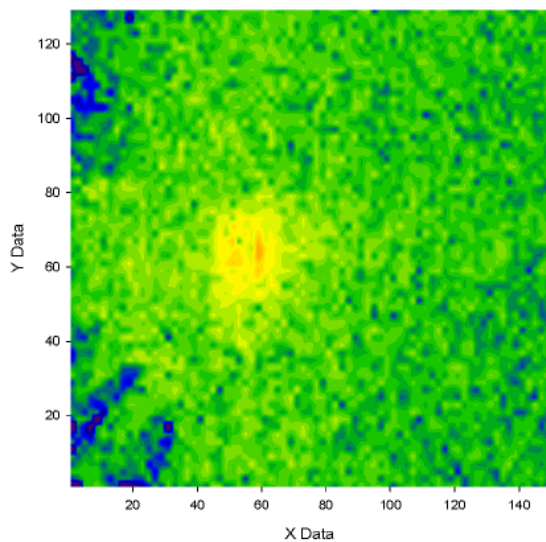


Semáforo 4. A4 R1

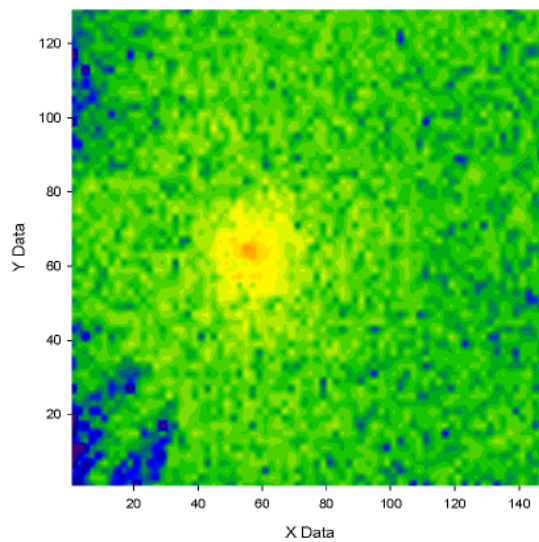


SEMÁFORO 5:

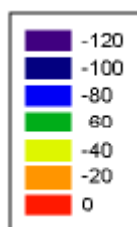
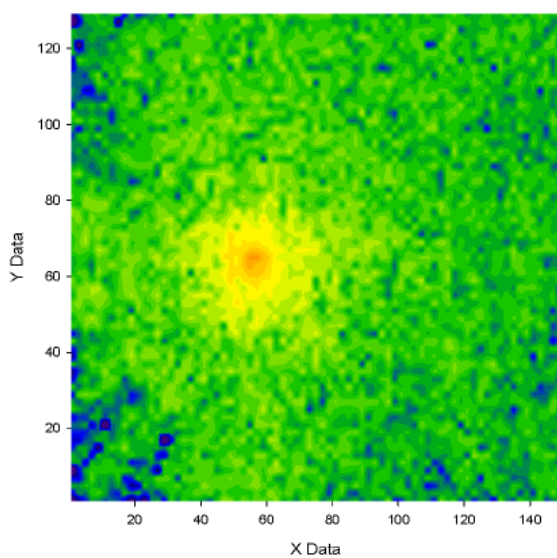
Semáforo 5. A2 R1



Semáforo 5. A3 R1

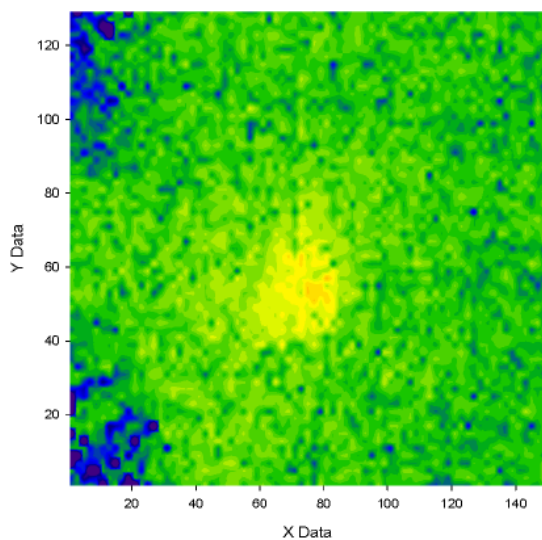


Semáforo 5. A4 R1

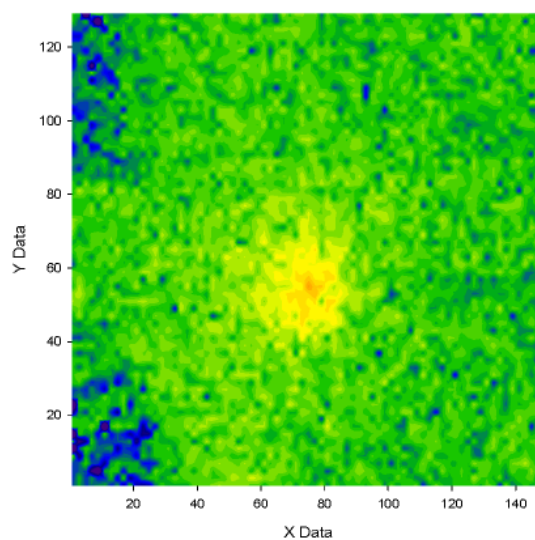


SEMÁFORO 6:

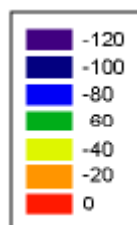
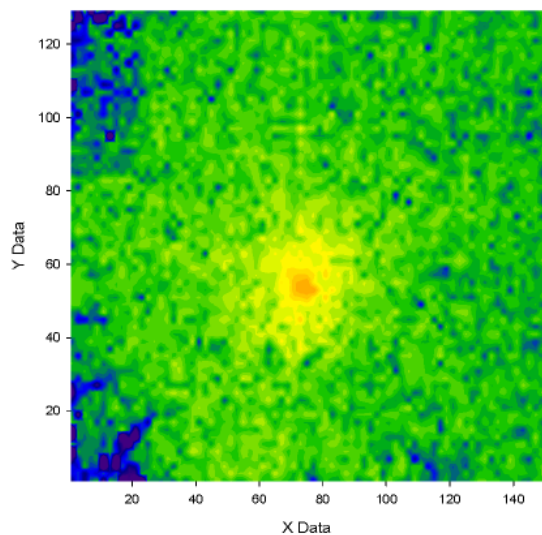
Semáforo 6. A2 R1



Semáforo 6. A3 R1

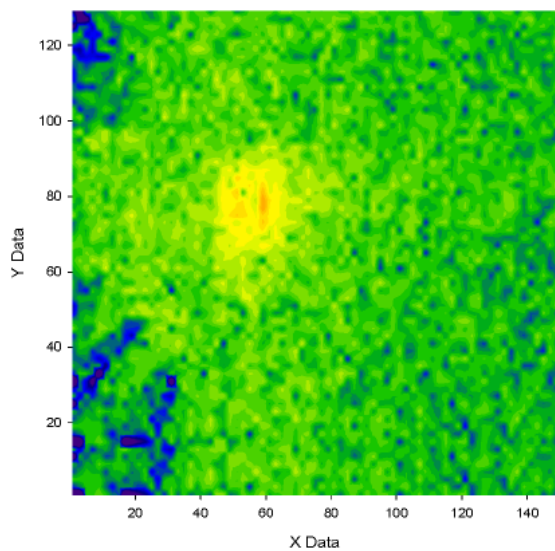


Semáforo 6. A4 R1

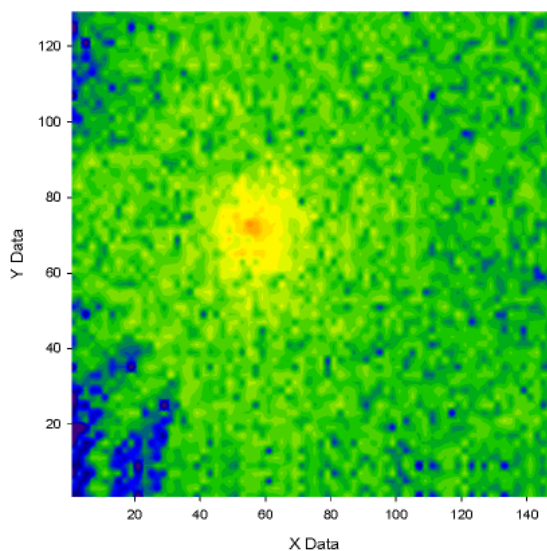


SEMÁFORO 7:

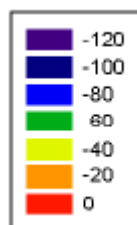
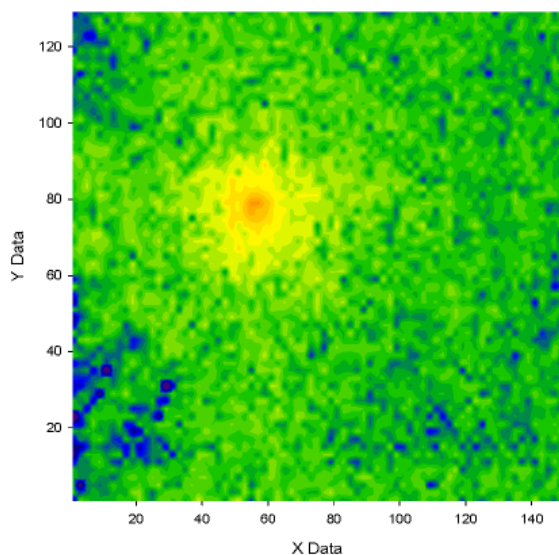
Semáforo 7. A2 R1



Semáforo 7. A3 R1

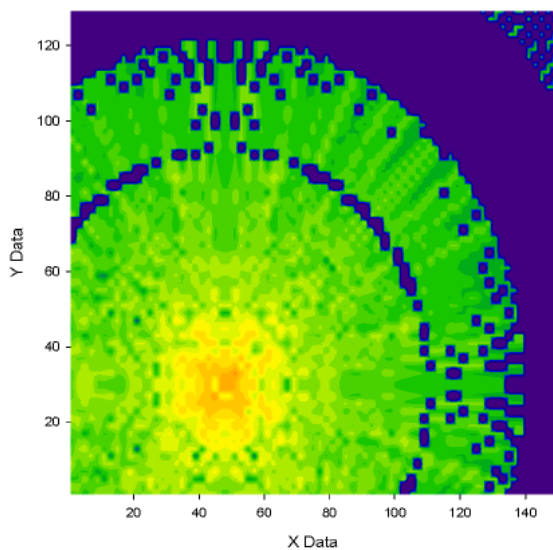


Semáforo 7. A4 R1

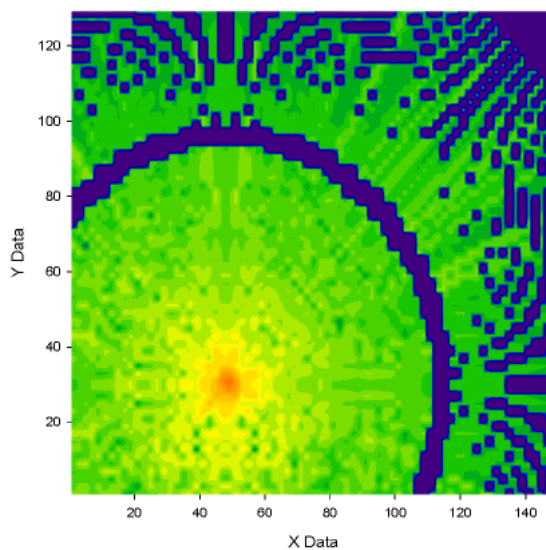


SEMÁFORO 8:

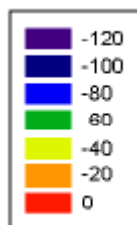
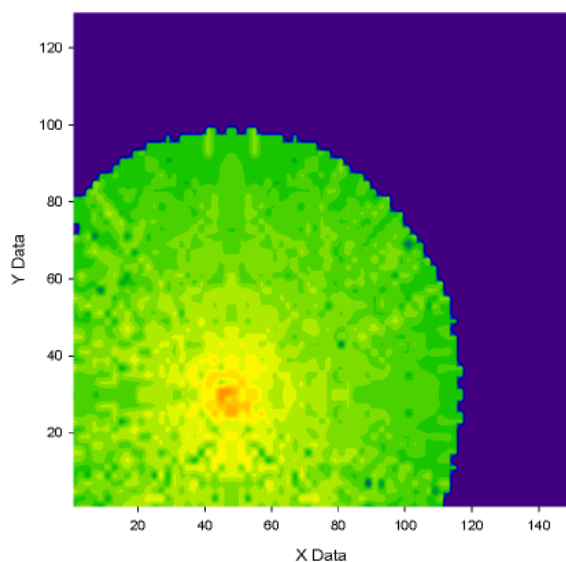
Semáforo 8. A2 R1



Semáforo 8. A3 R1

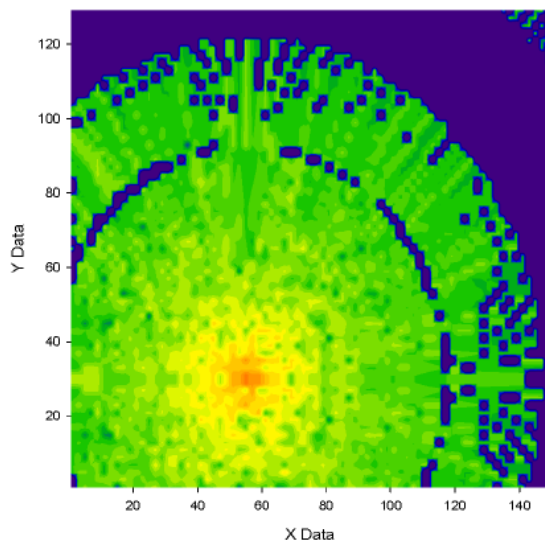


Semáforo 8. A4 R1

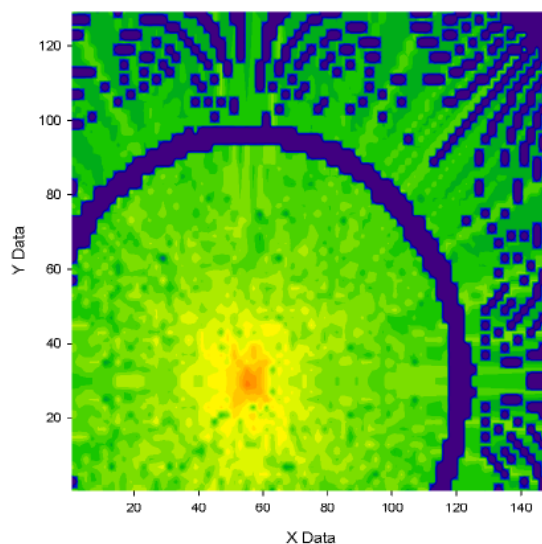


SEMÁFORO 9:

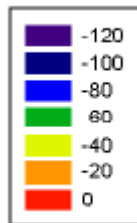
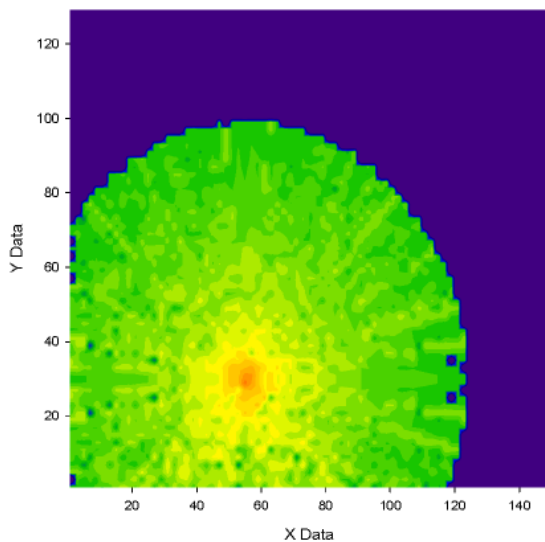
Semáforo 9. A2 R1



Semáforo 9. A3 R1

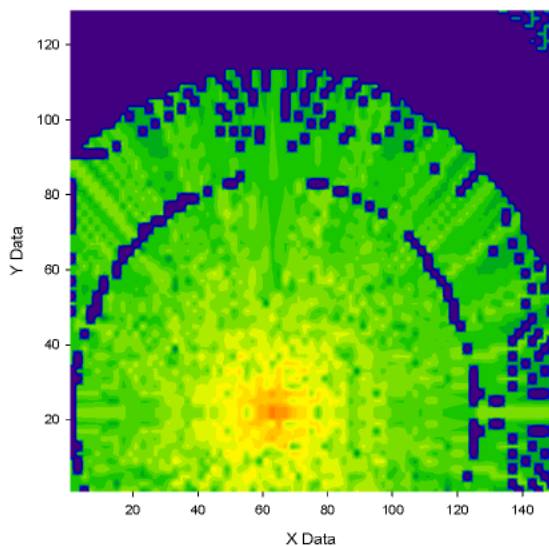


Semáforo 9. A4 R1

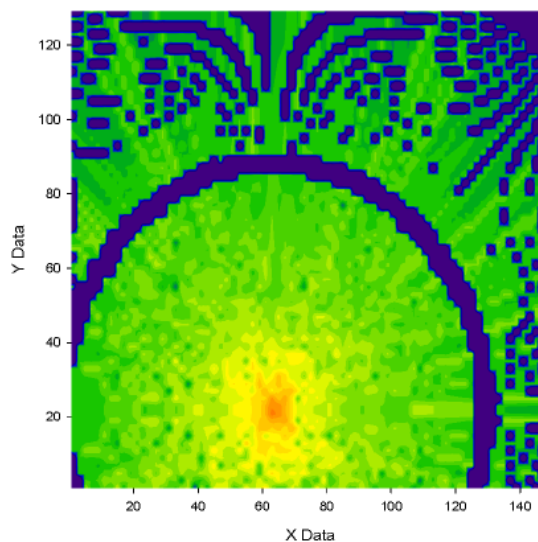


SEMÁFORO 10:

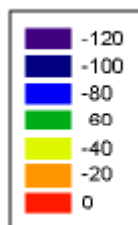
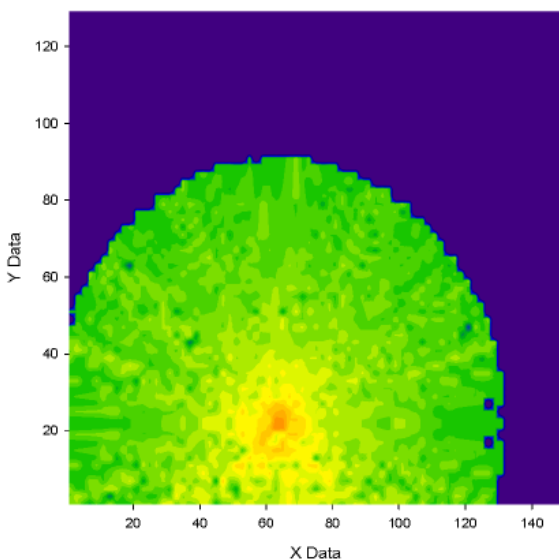
Semáforo 10. A2 R1



Semáforo 10. A3 R1

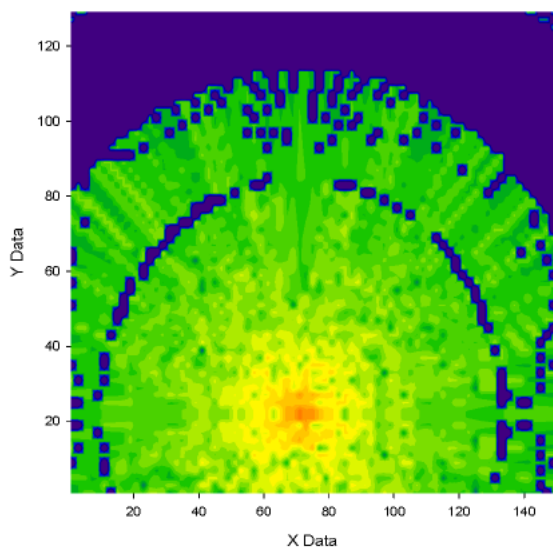


Semáforo 10. A4 R1

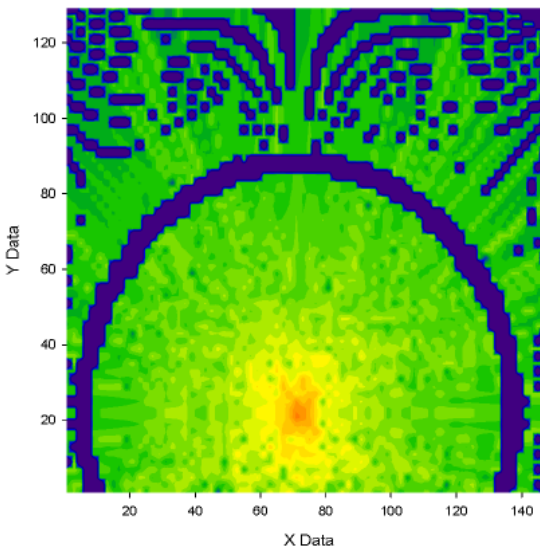


SEMÁFORO 11:

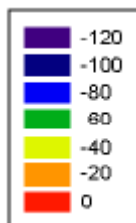
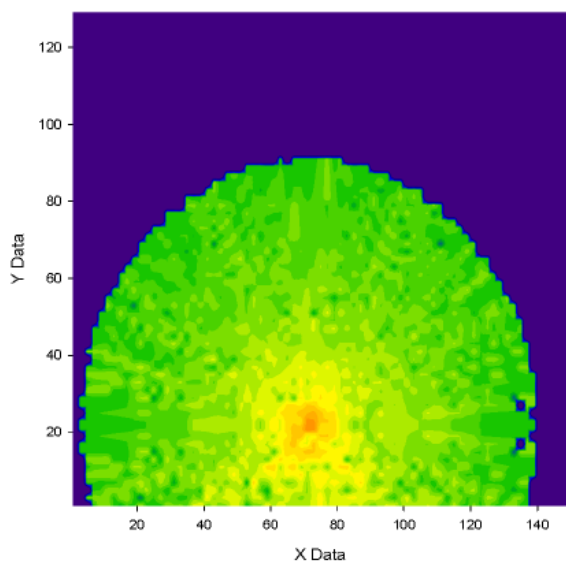
Semáforo 11. A2 R1



Semáforo 11. A3 R1

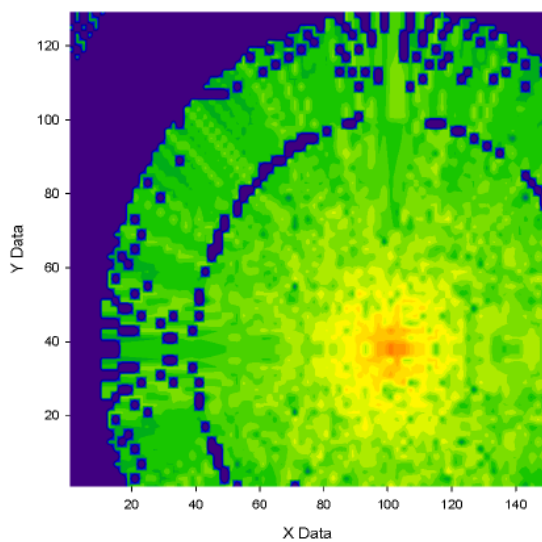


Semáforo 11. A4 R1

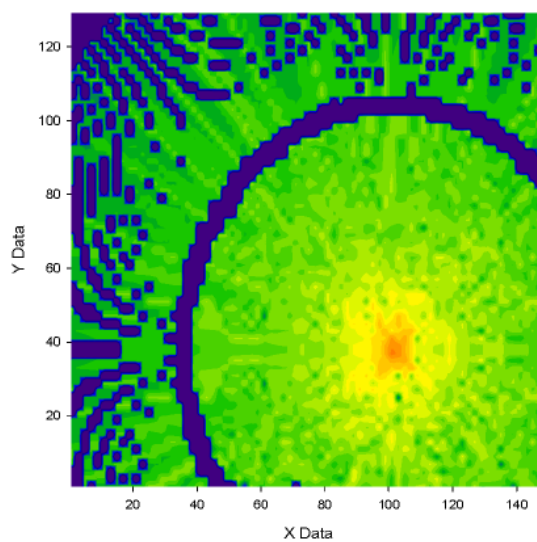


SEMÁFORO 12:

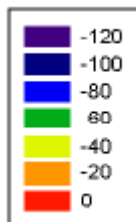
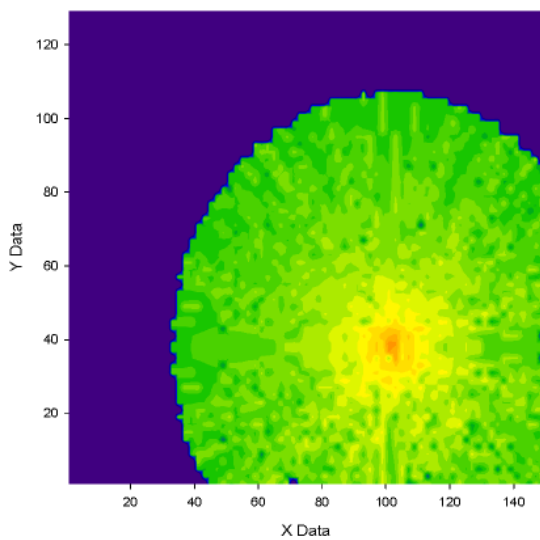
Semáforo 12. A2 R1



Semáforo 12. A3 R1

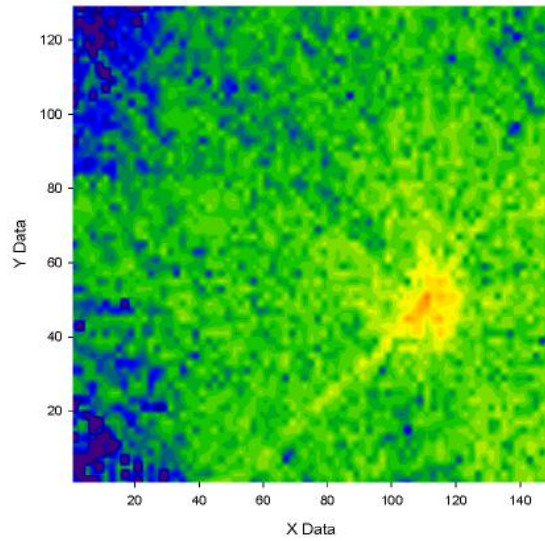


Semáforo 12. A4 R1

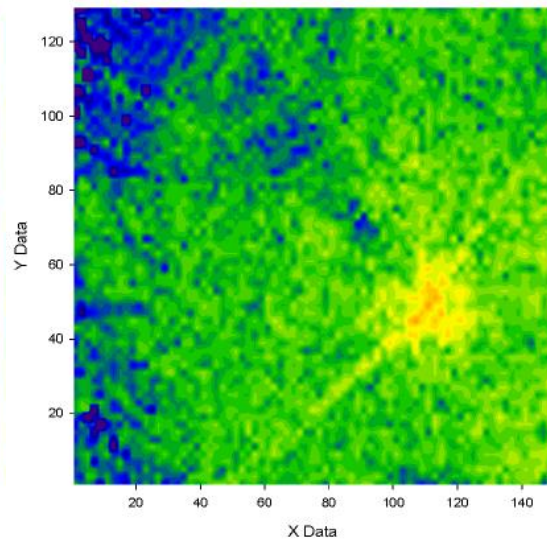


SEMÁFORO 13:

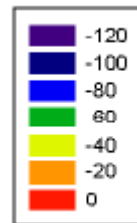
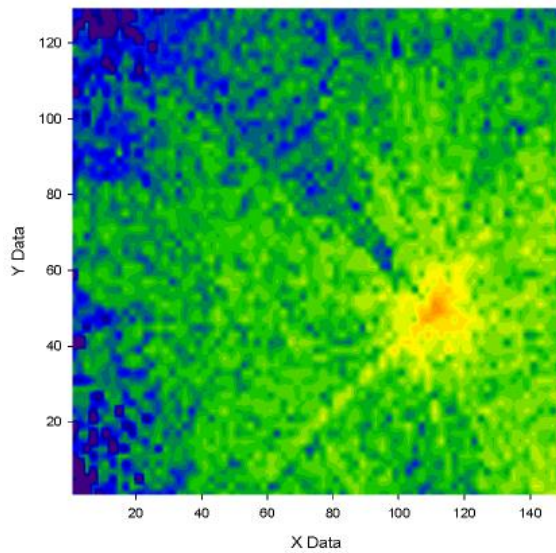
Semáforo 13. A2 R1



Semáforo 13. A3 R1

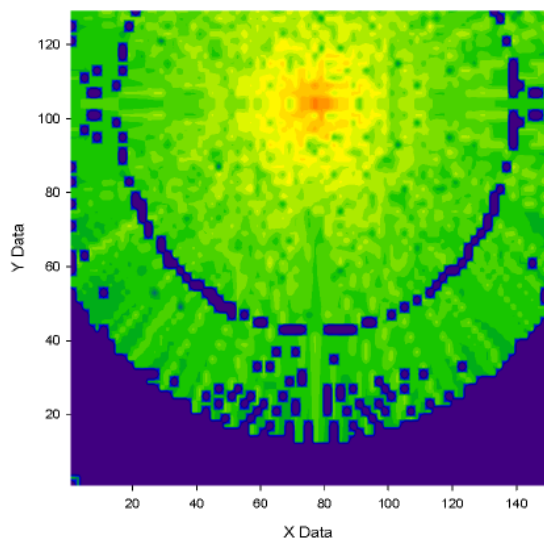


Semáforo 13. A4 R1

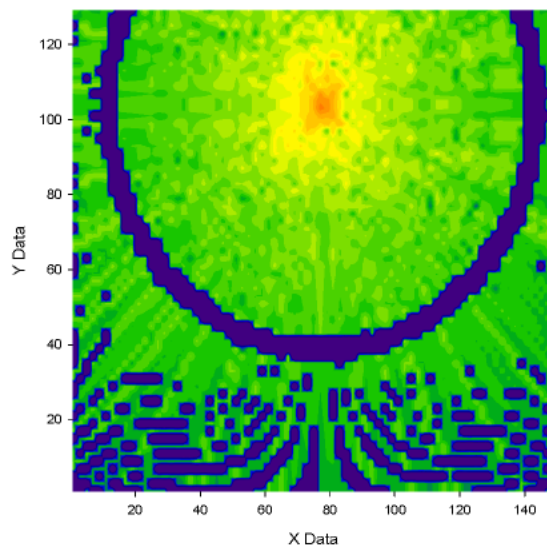


SEMÁFORO 14:

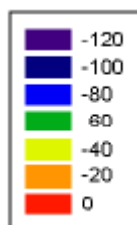
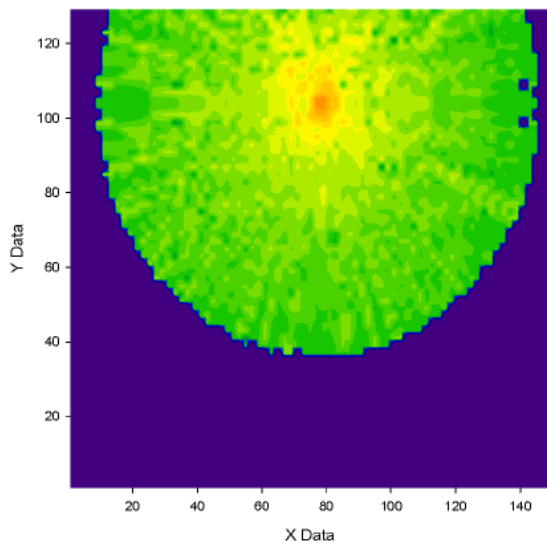
Semáforo 14. A2 R1



Semáforo 14. A3 R1

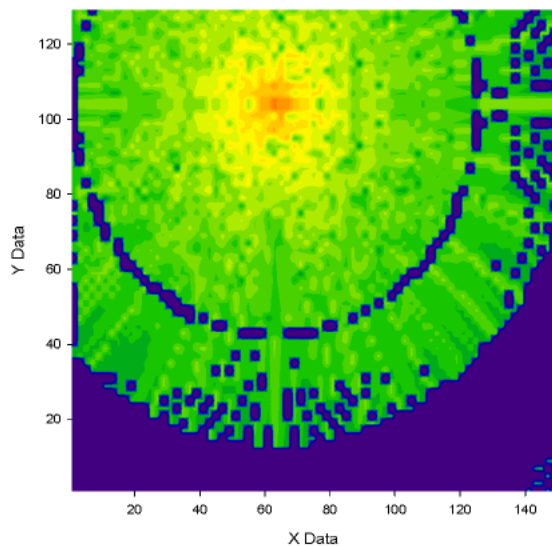


Semáforo 14. A4 R1

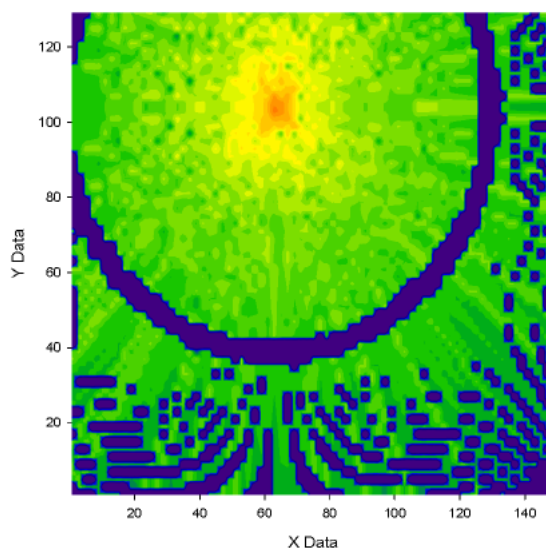


SEMÁFORO 15:

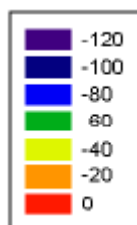
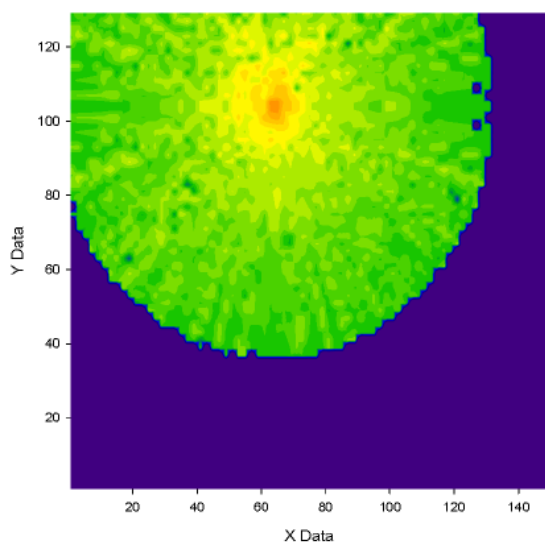
Semáforo 15. A2 R1



Semáforo 15. A3 R1

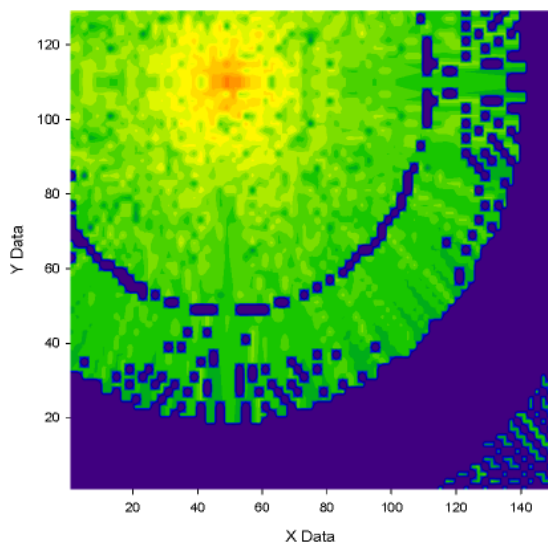


Semáforo 15. A4 R1

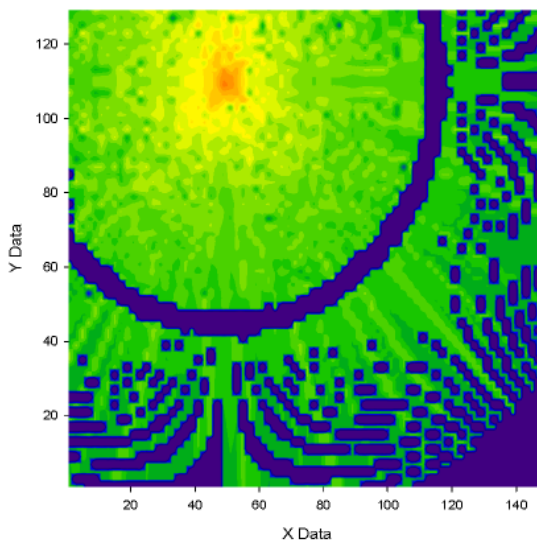


SEMÁFORO 16:

Semáforo 16. A2 R1



Semáforo 16. A3 R1



Semáforo 16. A4 R1

