

Brunela Nardi Farreras, Agueda García Carrillo, Eva M. Vidal López
UPC

1. Introducción

Según datos de las Naciones Unidas actualmente la mitad de la población mundial vive en ciudades. En Europa esta cifra es del 74 % según datos de Naciones Unidas para el año 2018. La población urbana ha crecido exponencialmente, de 751 millones de personas en 1950 a 4200 millones en 2018, y se seguirá la misma tendencia en los próximos años. Esta concentración de habitantes en las ciudades pone de manifiesto significativos retos que deben abordarse para garantizar la sostenibilidad y el estado de bienestar. El aumento exponencial de la población en las ciudades hace necesaria una evolución del concepto “ciudad”.

Una de las primeras apariciones de los términos vinculados a la Smart City se da en el año 1987 en el *Informe Brundtland de las Naciones Unidas* (1987). En este informe se hace mención del “desarrollo sostenido” considerando el concepto como una estrategia de sostenibilidad ambiental de cara al año 2000. En un momento como el actual, en el que la cantidad de personas que habitan las ciudades es una cifra en constante crecimiento, las grandes urbes evolucionan hacia una metrópolis inteligente, innovadora y sobre todo sostenible. Ahí es donde, al menos de manera conceptual, se entrelazan los conceptos asociados al “desarrollo sostenido” y a la Smart City como una herramienta para conseguirlo.

El concepto Smart City empezó a crecer y a instaurarse con el apoyo de conferencias, congresos y con la implementación de soluciones inteligentes en muchas ciudades alrededor de todo el globo. Con esto surgen las primeras dudas: ¿Tiene el concepto *Smart City* la verdadera respuesta a los retos más importantes a los que se enfrentan las ciudades? ¿Existe o puede llegar a ser real la *Smart City* con la conceptualización que se promueve? ¿Son eficientes y concluyentes los resultados de la implantación de sistemas inteligentes en las ciudades, estás cuantificados? ¿Cuál es el impacto ambiental asociado a la implantación de estas soluciones TIC? ¿Es proporcional la gran repercusión discursiva del término (conferencias, informes, congresos...) a la implantación efectiva y práctica de este? ¿Tiene sentido su irrupción en todas las agendas políticas y urbanas?

Naturalmente la implementación de estas técnicas genera grandes oportunidades para mejorar la gestión de la ciudad y la reducción de impactos. Sin embargo, al mismo tiempo, la producción, el uso, el mantenimiento y la disposición final de los dispositivos que la conforman tienen también costes asociados, principalmente medioambientales, que son los más difíciles de evaluar y de analizar. Tanto a nivel bibliográfico como práctico la cuantificación del impacto *per se* que supone la “construcción” de la tecnología Smart City, en términos de desarrollo sostenible, es un área aún por explorar y definir.

Con este trabajo se pretende poner de manifiesto la necesidad de la cuantificación de este impacto, para poder objetivarlo y generar nuevos campos de actuación.

2. Objetivos

El objetivo general de este proyecto es desarrollar y proponer una metodología que permita identificar, evaluar y cuantificar los impactos ambientales, económicos y sociales asociados a una red de sensores inalámbrica, estructura principal de las *Smart Cities*.

Se pretende determinar la carga ambiental del sistema anterior en sí mismo, considerando el conjunto de tecnología aplicada.

Para la obtención del objetivo general se han planteado los siguientes objetivos específicos:

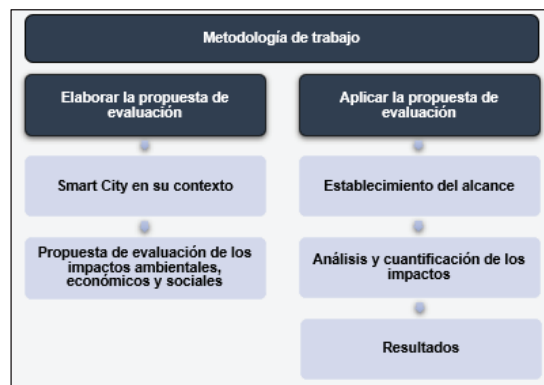
- Elaborar una propuesta metodológica de análisis y cuantificación de los impactos ambientales, económicos y sociales vinculados a la puesta en marcha y funcionamiento de una red de sensores inalámbrica (WSN por sus siglas en inglés).
- Aplicar la propuesta metodológica de análisis y cuantificación de los impactos ambientales, económicos y sociales a un caso de estudio.
- Obtener un estudio que sirva de referencia para la aplicación de la propuesta metodológica e identificación de puntos de mejora del sistema Smart Cities.
- Este tipo de estudios no es común, por lo que el carácter innovador del mismo le confiere la oportunidad de ser pionero y potenciar otro tipo de proyectos de sostenibilidad vinculados.

Los resultados de este trabajo contribuirán a fortalecer instancias que estén relacionadas con la gestión sostenible de la ciudad, de tal manera que continúen con la formulación e implementación de políticas vinculadas a la eficiencia y el medio ambiente.

3. Propuesta metodológica de evaluación de la sostenibilidad de una WSN vinculada al concepto *Smart City*

A continuación, se presenta la metodología seguida para el desarrollo del siguiente trabajo:

Figura 1: Metodología de trabajo desarrollada. Fuente: Elaboración propia



3.1. Propuesta para establecer el alcance de la evaluación

Definir los límites del sistema y establecer el alcance de la evaluación, es una de las etapas más importantes, ya que determinan qué es lo que se incluye dentro del sistema estudiado y qué es lo que se excluye. Por ejemplo, etapas consideradas no significativas dentro de cualquiera de los impactos. Es por esto, por lo que el primer punto de la metodología que se propone es, atendiendo a cada caso de estudio, establecer los criterios y delimitar detalladamente cuál será el campo de actuación y hasta dónde llega.

3.2. Procedimiento propuesto para el análisis y cuantificación de los impactos ambientales

En cuanto al impacto ambiental, se desarrolla una fórmula que permite cuantificar el impacto ambiental asociado a cualquier red de sensores inalámbrica, tecnología sobre la que se fundamenta el concepto “*Smart City*”.

Este impacto tiene el objetivo subyacente de detectar los puntos críticos dentro de la fase de implantación, uso y desmantelamiento de la red inalámbrica de sensores. Se considerará un enfoque basado en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la red, como se muestra a continuación:

Tabla 1: Interconexión entre el ACV de la WSN y el de sus nodos. Fuente: Environmental Impact Assessment Model for Wireless Sensor Networks (Bonvoisin et al. 2011)

		ACV de la red de sensores inalámbrica		
		Implantación	Explotación /Fase de Uso	Fin vida útil
ACV de los nodos	Fabricación	✓	✓	
	Transporte	✓	✓	
	Instalación	✓	✓	
	Uso		✓	
	Extraerse		✓	✓
	Final de vida útil		✓	✓

Para el desarrollo de la fórmula se ha partido del estudio realizado por los autores Jeremy Bonvoisin, Alan Lelah, Fabrice Mathieux y Daniel Brissaud volcado en el artículo “Environmental Impact Assessment Model for Wireless Sensor Networks” (2011). Dicho estudio tiene como propósito principal definir qué parámetros de diseño son responsables de los impactos ambientales más significativos asociados al despliegue y operación de las WSN.

La fórmula propuesta del estudio antes citado para la cuantificación del impacto ambiental asociado a las redes WSN se muestra en la siguiente Ecuación (1).

$$I = \sum_{\text{nodos}} \left[DEP_n + \left(REP_n \times \left(\frac{P}{L_e} \right) + CON_n \right) + DIS_n \right]$$

Dónde:

- **I**: Es el impacto ambiental total del análisis del ciclo de vida de la WSN, expresado como la suma de los impactos ambientales de sus nodos;
- **DEP_n**: Es el impacto ambiental del nodo *n* durante la etapa de despliegue de la WSN, que corresponde a la fabricación, transporte e instalación del nodo *n*;
- **REP_n**: Es el impacto ambiental de la sustitución del nodo *n* durante la etapa de explotación de la WSN, que corresponde al ciclo de vida del nuevo nodo que reemplaza al nodo *n*;
- **CON_n**: Es el impacto ambiental del consumo de energía del nodo *n* durante la fase de explotación o fase de uso;
- **DIS_n**: Es el impacto ambiental del nodo *n* durante la etapa de desmantelamiento de la WSN, que corresponde a la eliminación y final de la vida útil del nodo *n*;

- L_e : Es la vida útil del nodo n ;
- P : Es el periodo de explotación considerado de la WSN.

La aplicación directa de la Ecuación 1 se ha descartado en este trabajo debido a que no propone factores bien definidos asociados a las etapas de instalación, mantenimiento y desmantelamiento de la WSN. Por esto, el objetivo de este estudio pretende ofrecer una imagen completa de la WSN considerando **todas** las etapas de la implantación y funcionamiento de las redes de sensores inalámbricas. Así, la fórmula desarrollada y propuesta para la cuantificación del impacto ambiental en este trabajo es la siguiente Ecuación (2).

$$I = \sum (FAB + CON + Ewaste) + INST_n + MANT_n + DES_n$$

Dónde:

- I : Es el impacto ambiental total del análisis del ciclo de vida de la WSN, expresado como la suma de los impactos ambientales;
- FAB : Es el impacto ambiental asociado a la fabricación del *nodo n*, incluyendo desde la extracción de materias primas hasta que sale por la puerta de la fábrica;
- CON : Es el impacto ambiental asociado al consumo de energía del *nodo n* durante la fase de explotación de la red;
- $Ewaste$: Es el impacto ambiental asociado a la eliminación y/o tratamiento del nodo al final de su vida útil.
- $INST_n$: Es el impacto ambiental asociado a la instalación del *nodo n* durante la fase de despliegue de la WSN;
- $MANT_n$: Es el impacto ambiental asociado a la fase de mantenimiento del *nodo n* durante la fase de explotación de la red. Dentro de este factor se incluye también el impacto vinculado a la sustitución del nodo en caso de que haya dejado de funcionar antes de que finalice su vida útil. Ecuación (3):

$$MANT_n = X + (FAB_n * P)$$

Dónde:

- X : Es el impacto en kgCO₂eq de las tareas asociadas al mantenimiento (transporte, uso de herramientas...);
- FAB_n : Es el impacto ambiental asociado a la fabricación del nodo n , incluyendo desde la extracción de materias primas hasta que sale por la puerta de la fábrica;
- P : Es la probabilidad de que haya que sustituir el nodo por uno nuevo en tanto por uno;
- DES_n : Es el impacto ambiental asociado al nodo y durante la etapa de desmantelamiento de la WSN;

La fórmula definida mediante la **Ecuación (2)** no tiene en cuenta ni el impacto de la red de telecomunicaciones ni el de la plataforma de servicio. Esto se debe a que el modelo se concibió para que se considerara en el impacto ambiental de la red *per se* y permitiera la cuantificación de los elementos tangibles de la misma.

A continuación, en el siguiente apartado se describirá la metodología que se ha escogido para hacer el análisis del impacto económico.

3.3. Procedimiento propuesto para el análisis y cuantificación del impacto económico

Para el análisis del impacto económico de la WSN se considera el impacto asociado a la red de sensores *per se* y el impacto causado por el uso de la red.

Figura 2. Distribución de impactos económicos. Fuente: Elaboración propia



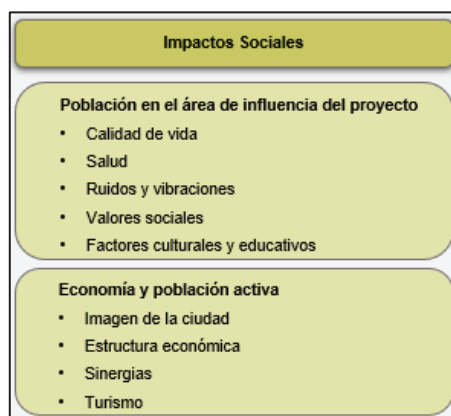
3.4. Procedimiento propuesto para el análisis de los impactos sociales

Para el análisis de los impactos sociales de la WSN se consideran:

- La población en el área de influencia del proyecto
- Economía y población activa

A continuación, en la siguiente figura se muestran los aspectos socioeconómicos que según un estudio de la revista Internacional de Sociología (2007), deberían incluirse. En el caso de la evaluación del impacto social vinculado a la implantación de una red de sensores inalámbrica, se ha considerado que se deben tener en cuenta los factores especificados en la siguiente figura.

Figura 3. Aspectos socioeconómicos de la evaluación de impacto social. Fuente: Aspectos Socioeconómicos de la Evaluación de Impacto Ambiental. (Revista Internacional de Sociología, 2007)



Cabe destacar, que los factores que se proponen a considerar en un caso como este, en el que se pretende evaluar los impactos sociales vinculados a la implantación de una WSN, pueden inducir impactos tanto positivos como negativos.

4. Resultados de la aplicación de la metodología propuesta a Terrassa *Smart City*

Para poder aplicar la metodología que se expone en el presente trabajo, en primer lugar, se destaca que se colaboró con el Ayuntamiento de Terrassa y con el fabricante de sensores de ruidos CESVA Instruments, dotando este estudio de todos los datos que pudieron facilitar.

En lo que se refiere a la aplicación del caso de estudio, primeramente, se analizó la ciudad de Terrassa dentro del contexto *Smart City*, atendiendo a factores como: grado de madurez de la ciudad, misión y visión y retos estratégicos. Luego, se aplicó la metodología antes descrita para establecer el alcance y analizar y cuantificar los impactos ambientales, económicos y sociales. Finalmente, se obtuvieron resultados y se presentaron conclusiones.

En cuanto al alcance, se ha atendido a tres dimensiones: El alcance de la información básica, es decir de dónde provendrá la información, el límite temporal, qué periodo se abarcará y los límites organizativos, lo que se traduce en qué red se analizará y qué elementos de incluyen y/o excluyen de esta.

En este caso, en la siguiente figura se puede apreciar qué se ha considerado para este caso de estudio en el que se aplica la metodología desarrollada en este trabajo a la ciudad de Terrassa.

Figura 4. Establecimiento del alcance para el caso de estudio de la ciudad de Terrassa. Fuente: Elaboración propia



Una vez establecido el alcance, como se muestra en la figura anterior, tal y como se señala en los límites organizativos, en el presente trabajo se evaluaron los impactos de la red de sensores de ruido de Terrassa, que está compuesta por 10 sensores TA120 del fabricante CESVA Instruments. A continuación, se presenta una figura explicativa de la red de sensores de ruido de la ciudad de Terrassa:

Figura 5. Estructura de la red de sensores de ruido inalámbrica de la ciudad de Terrassa. Fuente: Plataforma Sentilo (2019) y hoja de especificaciones técnicas del sensor TA 120 (CESVA Instruments)



Una vez ha quedado definido el alcance, tal y como se muestra en la figura 1, se procede a la cuantificación de los impactos atendiendo a la metodología explicada. A continuación, se presentan los resultados obtenidos del impacto ambiental, económico y social.

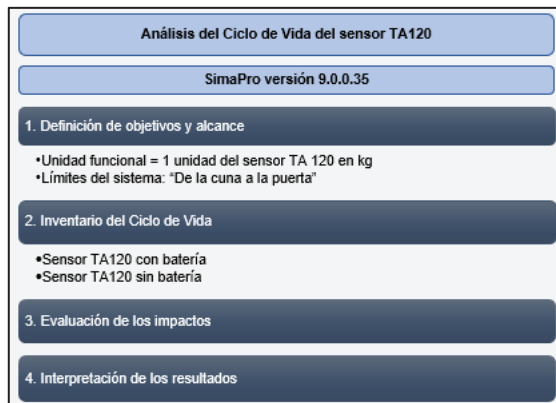
Resultados del Impacto Ambiental asociado a la red inalámbrica de sensores de ruido en la ciudad de Terrassa

Para la cuantificación del impacto ambiental, expresado en kg de CO₂, de la red inalámbrica de sensores de ruido en la ciudad de Terrassa se empleó la fórmula de la **Ecuación (2)**. Se obtuvieron los siguientes resultados para cada uno de los factores que se contemplan:

Determinación del factor FAB:

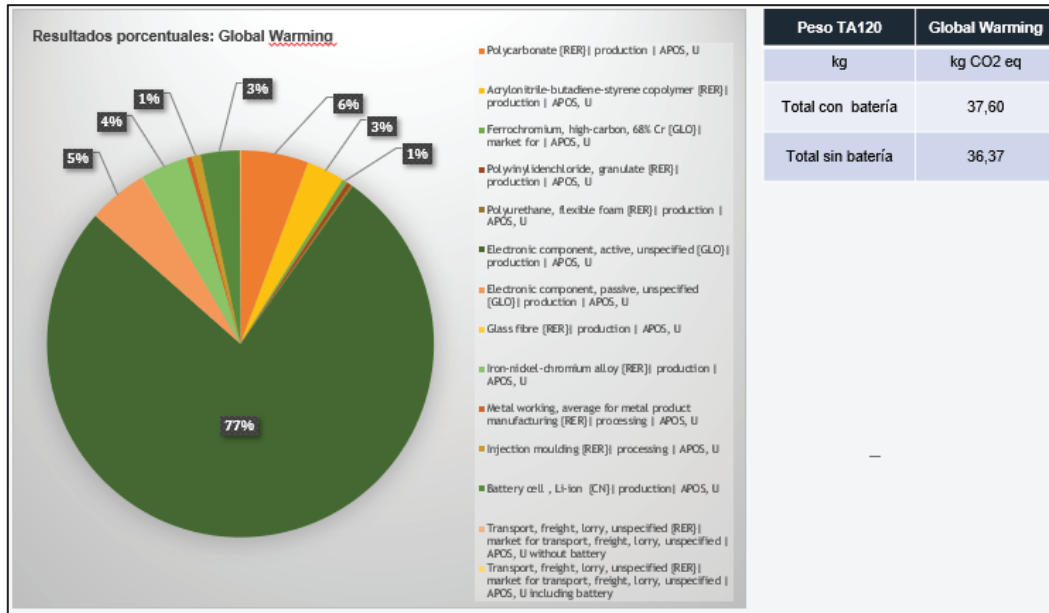
Como se muestra en la siguiente figura, para determinar el factor fabricación se realizó un análisis del ciclo de vida del sensor TA 120 a través de la herramienta SimaPro, se consideró para este trabajo la categoría de impacto Global Warming y se utilizó la metodología ReCiPe v1.1 (Goedkoop *et al.*, 2018) con perspectiva jerárquica.

Figura 6. Análisis de Ciclo de Vida del sensor TA 120. Fuente: Elaboración propia



Del análisis del ciclo de vida del sensor TA 120 para la categoría de impacto Global Warming, se obtuvieron los siguientes resultados porcentuales atendiendo al inventario considerado.

Figura 7. Resultados obtenidos del ACV del sensor TA 120. Fuente: Elaboración propia



Determinación del factor CON:

Para determinar el factor consumo de la Ecuación (2) se consideró lo siguiente:

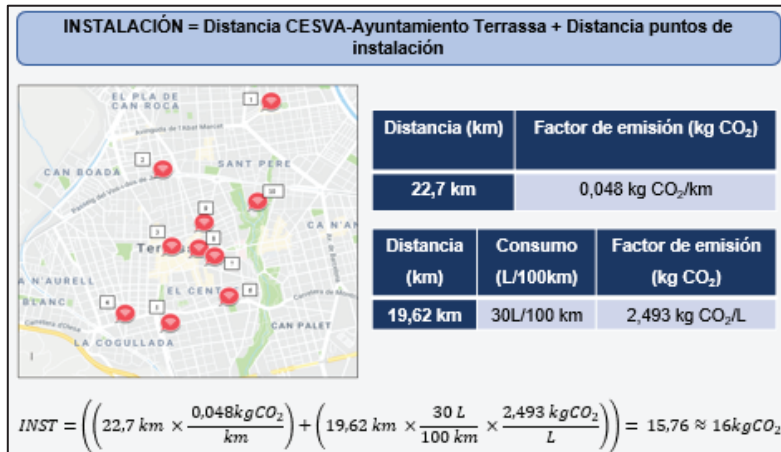
Figura 8. Determinación del factor CON. Fuente: Elaboración propia

Datos para determinar la emisión total en kg CO ₂ asociada al consumo eléctrico de los sensores		
$E = P \times t \rightarrow kWh$		
Años	10	años
Días	365	días
Horas	24	horas
Potencia consumo red eléctrica(W)	1	W
Factor de emisión (kg CO ₂ /KWh)	0,321	Kg CO ₂ /kWh
Consumo eléctrico en 10 años	87600	Wh
	87,6	kWh
Emisión total	28,12	kg CO ₂
$CON = \left(28,12 kWh \times 0,321 \frac{kg CO_2}{kWh} \right) = 28,12 \approx 28 kg CO_2$		
$CON = (10 \times 28)kg CO_2 = 280 kg CO_2$		
<p>La Oficina Catalana del Cambio Climático realiza una estimación del mix eléctrico. El mix de la red eléctrica peninsular de 2018 se estima en 0,321 kg CO₂/kWh</p>		

Determinación de los factores INST, MANT y DES:

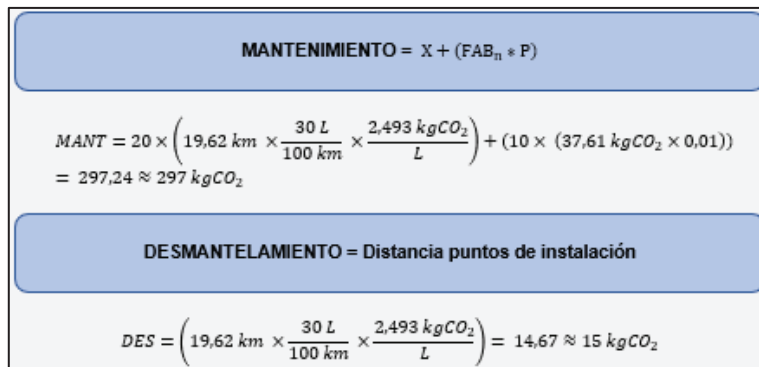
Para determinar el factor instalación de la Ecuación (2) se consideró lo siguiente:

Figura 9. Determinación del factor INST. Fuente: Elaboración propia



Para determinar los factores mantenimiento y desmantelamiento de la Ecuación (2), cabe destacar que se ha considerado que la emisión asociada al desmantelamiento de la red inalámbrica de sensores de ruido, es decir, la que se identifica con el factor DES de la fórmula, será igual a la emisión asociada a la fase de instalación considerando en este caso, solo el impacto que se vincula al desplazamiento del camión cesta por los diferentes puntos de la ciudad de Terrassa. En el caso del factor asociado al mantenimiento de la fórmula propuesta, la emisión de CO₂ vinculada a su impacto es diferente con respecto al caso de la instalación y el desmantelamiento. Esto es porque, en primer lugar, hay que considerar el factor tiempo, el mantenimiento se repetirá una vez al año durante los 10 años que se han planteado de vida útil de la red, y además también se ha considerado la operativa que sigue el Ayuntamiento de Terrassa al respecto.

Figura 10. Determinación del factor MANT Y DES. Fuente: Elaboración propia



Por lo tanto, contemplando los factores previamente calculados, a continuación, se presenta el resultado obtenido con respecto al impacto ambiental de la red de sensores de ruido de la ciudad de Terrassa:

Figura 11. Resultados del impacto ambiental. Fuente: Elaboración propia

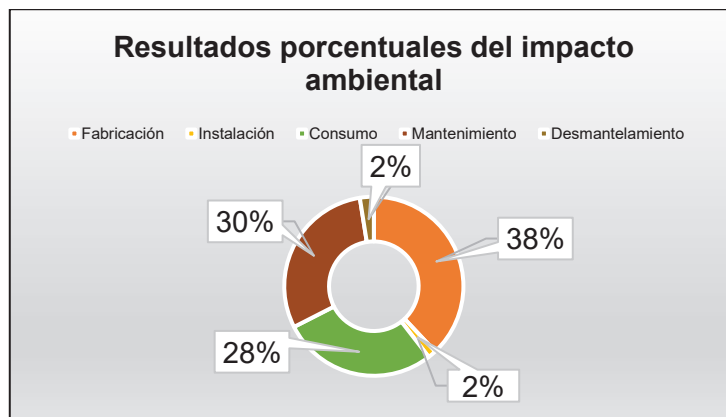
Resultados de los factores de la fórmula para la cuantificación del impacto ambiental					
Cantidad de sensores	FAB <i>kgCO₂</i>	INST <i>kgCO₂</i>	CON <i>kgCO₂</i>	MANT <i>kgCO₂</i>	DES <i>kgCO₂</i>
1 sensor con batería	38	-	-	-	-
1 sensor sin batería	36	-	-	-	-
10 sensores (9 con batería y 1 sin)	378	15	280	297	15

$$I = \sum(FAB + CON + Ewaste) + INST_n + MANT_n + DES_n$$

$$I = (378 + 16 + 280 + 297 + 15) = 984 \text{ kgCO}_2$$

Expresando los resultados de los factores de la tabla en términos porcentuales, se obtiene que, en cuanto a aportación al impacto ambiental total, tienen una mayor repercusión la fabricación (38%), el mantenimiento (30%) y el consumo (28%), es decir, más de la mitad del impacto ambiental total de la red de sensores inalámbrica está asociada a procesos que no están relacionados, o no directamente, con la fabricación del sensor.

Figura 12. Resultados porcentuales del impacto ambiental asociado a la red de sensores de ruido de la ciudad de Terrassa. Fuente: Elaboración propia



Presentación de los resultados del Impacto Económico asociado a la red inalámbrica de sensores de ruido en la ciudad de Terrassa:

A continuación, se presentarán los datos obtenidos para la cuantificación del Impacto Económico considerando los procesos asociados a la implantación de la red inalámbrica de sensores de ruido en la ciudad de Terrassa.

Figura 13. Valor aproximado del impacto económico de red de sensores de ruido. Fuente: Elaboración propia

Resumen costes asociados a la implantación de la red			
Partidas de coste	Cantidad (unidades)	Coste (€)	Porcentaje %
Sensor TA120	10	4000,00	87%
Instalación	-	89,00	2%
Consumo	-	4,4	-
Mantenimiento	-	396,00	9%
Desmantelamiento	-	89,00	2%
Total Impacto Económico (€)		4600,00	100%

De la tabla anterior, se obtiene que en lo que se refiere a unidades monetarias, alrededor del 87% del presupuesto total estimado corresponde con el coste asociado al aprovisionamiento de los dispositivos (sensores).

Presentación de los resultados del Impacto Social asociado a la red inalámbrica de sensores de ruido en la ciudad de Terrassa:

Este impacto de la metodología propuesta por la limitación existente de acceso a datos no ha sido determinante. Sin embargo, sí se extrae que una realidad innegable que el término “smart” atribuye a las ciudades cierto atractivo mediático que normalmente es auspiciado por ayudas estatales para el desarrollo de proyectos inteligentes, pero, en virtud de esto... ¿Realmente todos y cada uno de los sensores que implantan en una *Smart City* contribuyen de manera efectiva a mitigar y/o mejorar algunos de los procesos de la ciudad? ¿Por qué se decide implantar tantos sensores? ¿Cómo se financian? ¿Realmente se emplean todos los datos que son capaces de proveer para desarrollar planes de mejora? Poder responder con claridad a estas preguntas es uno de los retos más importantes a los que enfrenta la Smart City en los próximos años.

5. Conclusiones

La acometida principal de este estudio ha sido poder analizar el impacto ambiental de la estrategia Smart City. Se pretende que este análisis sea un marco coherente, de carácter no exhaustivo, que dé la posibilidad de contribuir de manera crítica a los diferentes aspectos que conforman la temática “smart” en las ciudades.

De la aplicación de la metodología al caso de la red inalámbrica de sensores de ruido en la ciudad de Terrassa se extrae lo siguiente:

En lo que se refiere al impacto ambiental de la aplicación de la fórmula descrita para cuantificarlo, destaca el hecho de que aproximadamente el 38% del impacto se asocia a la fabricación del dispositivo (sensor) en términos de emisión de CO₂ eq. El resto y, por tanto, alrededor del 60% del impacto está vinculado a la implantación y gestión de la red, es decir, a la instalación, consumo, mantenimiento y desmantelamiento de esta.

La pregunta entonces es ¿Acaso no podría reducirse este 60% del impacto contribuyendo a la eficiencia de la gestión de la infraestructura que sustenta la estrategia “smart”? Para esto no haría falta la aplicación de sistemas inteligentes.

La coyuntura anterior llevó este análisis a plantearse cuál es el impacto económico directo de implantar una red inalámbrica de sensores. Entonces, y aun teniendo la limitación de que el sector de los dispositivos electrónicos está muy capado en cuanto a datos de precios, se consiguió hacer una aproximación al coste, considerando la compra de los dispositivos (sensores), su instalación, su consumo, mantenimiento y desmantelamiento atendiendo al espacio temporal de 10 años, periodo durante el cual se ha supuesto que la red estará en funcionamiento. Por tanto, del impacto económico se obtuvo que en este caso entre el 80 y el 90% del coste de implantar una red de sensores se asocia directamente a la compra de los dispositivos, esto reduce el resto del impacto económico a entre un 20 y un 10%. Lo que se traduce en que instalar, mantener, desmantelar y pagar el consumo eléctrico de la red de sensores, es muy barato con respecto al coste de comprar los aparatos.

De la cuantificación aproximada de estos dos impactos (ambiental y económico) la foto que se obtiene es que lo que supone un 60% en términos de emisión de CO₂ de la implantación de la red inalámbrica de sensores de ruido, en términos económicos supone solo alrededor de un 20% de la partida total de coste. Entonces... ¿Descuidan los gestores de las ciudades el impacto ambiental asociado a la infraestructura que sostiene el sistema "smart" porque en términos económicos les resulta casi despreciable o realmente no conocen su contribución real?

En términos sociales, el impacto de la red inalámbrica de sensores de ruido supondría todo un estudio detallado sobre las afectaciones positivas y negativas de la misma para con los ciudadanos, y su análisis más profundo se escapa del alcance del presente trabajo.

Finalmente, con este trabajo se ha pretendido poner de manifiesto que en la sofisticación de las ciudades no se contemplan algunos aspectos coyunturales de la implantación de las *Smart Cities*. Por lo tanto, este estudio pretende potenciar la realización de investigaciones que sufraguen un espíritu más crítico en la implantación sistematizada de tecnología.

6. Bibliografía

- Bonvoisin, J. & Lelah, A. & Mathieux, F. & Brissaud, D. (2011). Environmental Impact Assessment Model for Wireless Sensor Networks. G-SCOP Laboratory, Grenoble University, Grenoble, France.
- Canter, L.W. (1996) Environmental Impact Assessment. 2nd Edition, McGraw-Hill, New York.
- Informe de la Comisión Europea (2010). Una estrategia para un crecimiento inteligente, sostenible e integrador.
- Naciones Unidas (1987). Informe Brundtland. Oxford University Press.
- PricewaterhouseCoopers (2012). Estudios de Impacto Económico: Cómo valorar la repercusión y el retorno de iniciativas e inversiones pública.
- Revista Internacional de Sociología, Vol 65, No 47 (2007). Aspectos socioeconómicos de la evaluación de impacto ambiental.

Comunicación alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible:

