
ESTUDIO MEDIOAMBIENTAL DEL MUNICIPIO DE ALMADÉN MEDIANTE TELEDETECCIÓN

EMILIO RAMÍREZ-JUIDÍAS y JESÚS YANES-FIGUEROA

RESUMEN

El municipio de Almadén, Ciudad Real, España, declarado Patrimonio de la Humanidad en junio de 2012, es un claro ejemplo de mutua relación de sostenibilidad existente entre el eco-diseño de su entramado urbano y su patrimonio histórico-industrial, originando una evolución del paisaje muy peculiar. Esto, unido a su riqueza cultural, ha suscitado una fuerte atracción turística. En este estudio se analizaron un total de 30 imágenes Landsat procedentes del U.S. Geological Service para un periodo de 25 años (1991-2015), cada una de las cuales fue examinada y clasificada en un determinado lapso de tiempo con el fin de caracterizar correc-

tamente la integración paisajística tanto espacial como temporalmente. Los resultados muestran como la sostenibilidad ambiental de la ciudad permite reconocer y evaluar los diferentes cambios en la ordenación del territorio, en relación al momento en el que se realizaron las labores de restauración del área de estudio, antes (1991-2005), durante (2006-2008) y después (2009-2015) de las mismas, así como su relación intrínseca con la minería del mercurio y la evolución eco-sostenible de Almadén. La sostenibilidad de Almadén está directamente relacionada con los bajos niveles de precipitación y humedad relativa ambiental.

La teledetección es, actualmente, una de las herramientas más potentes y robustas tanto para la obtención de información espacial de variables urbano-medioambientales, como para la elaboración de mapas a partir de aquellas. De acuerdo con Chuvieco (2010), dicha herramienta permite obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de los datos adquiridos por un sensor remoto que no se encuentra en contacto con el mismo, mediante mediciones de la energía electromagnética reflejada o emitida por estos objetos o fenómenos de interés.

Por otra parte, la base de la teledetección se fundamenta en que cada cuerpo presenta un patrón de energía reflejada propio y diferente, conocido co-

mo firma espectral, que lo distingue del resto de materiales. Estas diferencias de comportamiento espectral intrínseco de cada elemento u objeto son las que permiten su discriminación y mapeo mediante técnicas de análisis y clasificación digital (Ramírez-Juidías *et al.*, 2015).

En el ámbito urbano, las continuas prácticas constructivas, así como sus impactos medioambientales asociados, han tenido gran interés para la teledetección en los últimos años, dando lugar a estudios basados en que el medioambiente urbano tiene que ser considerado como una nueva ciencia (Qihao *et al.*, 2012) dependiente no solo de las imágenes procedentes de plataformas espaciales, sino también de las tecnologías que permiten mejorar la resolución espacial, temporal y geométrica de aquellas, caso del LIDAR, a

través del uso de ciertos algoritmos de procesamiento (Ramírez-Juidías *et al.*, 2014; Stoker *et al.*, 2017).

Desde este punto de vista, cobra gran interés el uso de imágenes térmicas, ya que estas facilitan el análisis de las diferentes infraestructuras urbanas (edificaciones y carreteras entre otras) en base a la inercia térmica que presenta el material con el que se encuentran construidas. En este sentido, los estudios de Lagouarde *et al.* (2010) y Sobrino *et al.* (2012) son de enorme interés. No debemos olvidar la interconexión existente entre dichas infraestructuras, así como la interrelación entre estas y las áreas verdes, ya que las mismas llevan a tener en cuenta parámetros de sostenibilidad y eco-diseño del medioambiente urbano (Ramírez-Juidías, 2013).

Palabras Clave / Almadén / Minería del Mercurio / Sostenibilidad / Teledetección /

Recibido: 16/02/2016. Modificado: 20/02/2017. Aceptado: 22/02/2017.

Emilio Ramírez-Juidías. Especialista Universitario en Ecodiagnósticos Industriales y Master en Ingeniería del Agua, Universidad Politécnica de Madrid, España. Doctor, Universidad de Sevilla (US), España. Profesor, US, España. Dirección: Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica (ETSIA), US. Carretera de Utrera km 1, CP. 41013, Sevilla, España. e-mail: erjuidias@us.es

Jesús Yanes-Figueroa. Ingeniero Agrícola, US, España. Investigador, Grupo Construc-Tura para el Desarrollo, Sevilla, España.

A la hora de realizar una investigación mediante teledetección es de enorme importancia la fusión de imágenes (Pohl y Van Genderen, 1998), ya que permite integrar diferentes datos con el fin de obtener más información de la que podría ser adquirida mediante el uso de imágenes procedentes de un solo sensor. Un buen ejemplo (Nasr y Ramadan, 2008) es la fusión de imágenes efectuadas entre sensores sensibles a la radiación Visible e Infra-Roja (VIR) y aquellas captadas por el Radar de Apertura Sintética activa (RAS), ya que contribuyen a una mejor comprensión de los objetos observados al tener en cuenta tanto su reflectividad multispectral como las características de las superficies iluminadas.

Del mismo modo, la disponibilidad de datos específicos de la zona a estudiar juega un importante papel, sobre todo teniendo presente que la misma depende de la cobertura del satélite a utilizar, de los aspectos operacionales de la agencia espacial a la que pertenezca aquel, de la cobertura nubosa, del ángulo de inclinación solar en el momento de la toma de la imagen por parte del sensor, etc. De todos estos factores dependerá el número de imágenes a partir del cual se puede realizar el estudio de un área determinada.

No se puede olvidar la imposibilidad de obtener dato alguno mediante fuentes teledetectadas en días nublados, por lo que el uso de drones cobra enorme relevancia a la hora de llevar a cabo estudios como el expuesto. Del mismo modo, ha de ser evitable el realizar estudios de este tipo, o similar, con imágenes donde la existencia de sombras, debidas bien al desconocimiento de ciertos parámetros orbitales del satélite, bien a la mala planificación del trabajo a la hora de seleccionar imágenes, sea abundante, pues la totalidad de los softwares de tratamiento digital de imágenes teledetectadas que existen hasta la fecha las confunden con vegetación (Soudani y François, 2014), lo que da lugar a resultados erróneos desde el punto de vista medioambiental.

En estudio de teledetección no deben ser obviadas las variables climáticas históricas imperantes en la zona, esto es, datos básicos de temperaturas medias, máximas y mínimas, además de precipitación, debido a que, cuando existen en número estadísticamente significativo pueden ayudar a explicar ciertas características de reflectividad producidas a nivel de píxel, por ejemplo, por fenómenos de contaminación atmosférica (Ma, 2009).

Resulta de gran importancia para el presente trabajo tener en cuenta que en Almadén se dan mayores niveles de mercurio en el ambiente de lo que es habitual, lo que repercutirá en la

profundidad óptica de la atmósfera. Por tanto, al realizar el estudio mediante imágenes de satélite habrá que tener presente que la cantidad de radiación reflejada por cada objeto y que es captada por el sensor de la plataforma aerotransportada será menor de lo normal, originándose una lectura del valor por píxel inferior a la que se produciría si no existiera dicho contaminante. Esto tiene como consecuencia directa una disminución del número de bandas que se pueden utilizar y, por ende, aporta cierto error en la imagen que sólo puede ser corregido mediante un adecuado tratamiento digital (Ramírez-Juidías *et al.*, 2015).

En el presente estudio, el objetivo es documentar la evolución ecosostenible de Almadén y su relación con la minería del mercurio, para lo cual es necesario un adecuado estudio del territorio circundante, además de conocer el comportamiento del mercurio en el medioambiente. Por ello el uso de fuentes teledetectadas cobra interés, al permitir identificar su afección al crecimiento de la flora a través del índice de vegetación (NDVI), así como al del contenido en nutrientes, tanto en el suelo como en organismos vegetales. El manejo de estos aspectos en el tratamiento digital de imágenes son clave para poder determinar aquellos cambios en la ordenación del territorio minero de Almadén, que permitan ser reconocidos y evaluados mediante el estudio de la sostenibilidad ambiental.

Área de Estudio

De acuerdo con Millán *et al.* (2007), en el distrito minero de Almadén, Ciudad Real, España, situado en 38°45'11,85"N y 04°46'15,95"O, y formado por los municipios de Almadenejos, Chillón y Almadén (Figura 1), se encuentra la concentración natural de mercurio más grande del mundo, ocupando una superficie cercana a los 300km². Tejero (2011) y más tarde Ramírez-Juidías *et al.* (2014) especifican que la producción de mercurio, desde 1900 hasta 2003, alcanzó un total de 3.821.927 frascos, lo que representa más del 30% del mercurio producido en todo el mundo (Millán *et al.*, 2007). El distrito, que posee un clima tipo Csa según la clasificación de Köppen-Geiger, y donde se favorece la visita de turistas en los meses de verano a consecuencia de su idónea temperatura, está compuesto principalmente por depósitos de mercurio mineral en forma de cinabrio (HgS), aunque también está presente como mercurio elemental. Respecto a la contaminación actual, conviene decir que en la zona proviene de la deposición de mercurio atmosférico (Millán *et al.*, 2007), consecuencia de la actividad de explotación y transformación llevada a cabo durante siglos.

A este respecto, Tejero (2011) especifica que los primeros asentamientos sobre el territorio se produjeron entre el 3500 y 2500a.C., en plena Edad del Bronce. Se sabe muy poco acerca de

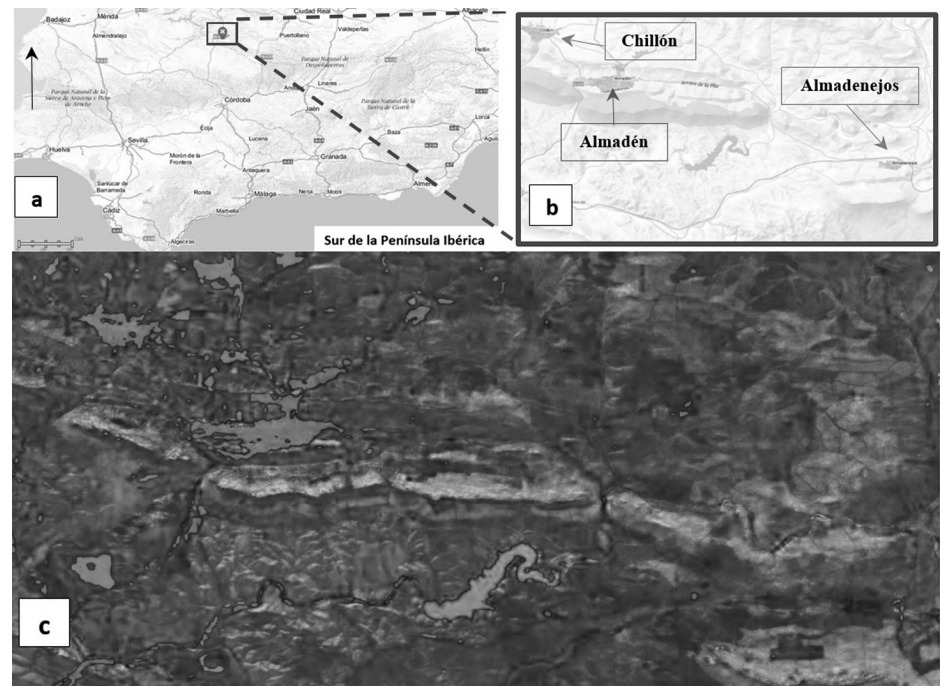


Figura 1. Localización del área de estudio. a: situación geográfica del área de estudio, b: área de estudio, c: resultado de fusión de imágenes parcial efectuada mediante la metodología de Ramírez-Juidías *et al.* (2015).

los primeros poblados, aunque las numerosas pinturas rupestres encontradas con abundancia del color rojo hace pensar que el cinabrio era ya utilizado en alguna que otra ceremonia de carácter religioso. Posteriormente, tanto romanos como árabes dieron lugar no solo a un aumento de la especialización agrícola, sino también a una mejora de las infraestructuras. Ello permitió, tras la reconquista, que la minería del azogue gozara de una gran influencia en la Comarca de Almadén al convertirse, cada uno de los municipios del entorno, tanto en grandes proveedores de materiales como de mano de obra para las minas.

Gustin *et al.* (2008) e Higuera *et al.* (2013) señalan que, actualmente, la relativa homogeneidad del contenido de mercurio en la atmósfera debe ser el resultado de un continuo intercambio entre suelo, vegetación y aire, lo que es adecuado, a corto plazo, tanto para la oxidación como para la deposición seca y húmeda de dicho elemento. Este hecho explicaría la variación del nivel máximo de mercurio en la atmósfera, de 20000ng·m⁻³ (Ferrara *et al.*, 1998), a 9485, 6892 y 916ng·m⁻³ medidos en marzo 2002, junio 2002 y abril 2011, respectivamente (Higuera *et al.*, 2013) tras el cese de toda actividad minera en el 2003 y los trabajos de restauración ejecutados en la zona principalmente desde mayo hasta septiembre de 2006, aunque la finalización de los mismos fue en 2008. Los valores más bajos medidos en los alrededores de la mina de Almadén fueron <200ng·m⁻³, en el 2007 (Higuera *et al.*, 2013).

Materiales y Métodos

Se descargaron un total de 30 imágenes del archivo Earth Explorer, perteneciente al U.S. Geological Service (USGS), las cuales cubrieron el periodo comprendido entre mayo 1991 y

mayo 2015 (Tabla I), ambos inclusive. Con el propósito de caracterizar adecuadamente el municipio de Almadén desde el punto de vista medioambiental, cada una de las imágenes fue examinada y clasificada en uno de tres periodos determinados de tiempo (1991-2005, 2006-2008 y 2009-2015) en función del momento en el que se realizaron las labores de restauración del área de estudio; esto es, antes de las mismas, durante aquellas y tras su ejecución. Todas las imágenes (Path 202 Row 33 “WRS-2” y Path 201 Row 33 “WRS-2”) fueron adquiridas durante el mes de septiembre de 2015. Posteriormente, y con el uso del Sistema de Información Geográfica (SIG) Ilwis, todas las imágenes: Landsat Thematic Mapper “TM”, Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus “ETM+” y Landsat 8-C “LC8” Operational Land Imager “OLI”, todas de 30m de resolución espacial, y Thermal Infrared Sensor “TIRS” de 100m de resolución especial re-escalada mediante convolución cúbica a 30m con el fin de que coincidan con las bandas multiespectrales del sensor OLI, fueron mejoradas (Figura 1c). Posteriormente, utilizando el algoritmo del vecino más cercano, se logró mantener sin cambios el brillo original de los valores de los píxeles, de acuerdo con Ramírez-Juidías *et al.* (2014).

A partir del análisis de los datos publicados por Ferrara *et al.* (1998), Higuera *et al.* (2003, 2013) y Millán *et al.* (2007) se obtuvo un modelo lineal que permite obtener, a partir de una imagen teledetectada, la cantidad de mercurio en la atmósfera en ng·m⁻³.

Se llevó a cabo una revisión bibliográfica destinada a determinar la posible existencia de un registro temporal de datos climáticos (temperatura y precipitación por estación) de Almadén, lo suficientemente amplio y significativo como para poder obtener resultados, discusión y conclusiones coherentes con la

presente investigación. A este respecto la información suministrada por la Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) y el Instituto de Meteorología de Portugal fue de gran importancia, al aportar un registro temporal de datos, con significancia ≤0,05, comprendido entre 1971 y 2000 (30 años).

Resultados y Discusión

El modelo para calcular la cantidad de mercurio atmosférico (Hg_{atm}), en ng·m⁻³, (r= 0,808; R²= 0,652) se presenta en la Ec. 1:

$$Hg_{atm} = 25669,27 - 0,033 |Chl|^{MSI} - 0,52[(MSI-L)/(1-NDVI)] - 0,001C_x - 0,006C_y + 2.364,88 |NDVI|^{MSI} - 5,79 (P/MSI) + 0,003 \cdot L^{MSI} \quad (1)$$

donde Chl (μg·cm⁻²): cantidad de clorofila calculada en base a la Ec. 2, MSI (adimensional): índice de humedad del suelo inferido con la Ec. 3, L: valor de la luminancia de cada pixel de la imagen deducida por la Ec. 4, NDVI (adimensional): índice de vegetación normalizado obtenido mediante la Ec. 5, C_x y C_y: coordenadas(m) correspondientes a los puntos donde se efectuaron las mediciones *in situ* referidas al sistema WGS84, y P (mm): precipitación media (estadísticamente significativa, p≤0,05, para un periodo de 30 años) del mes al que pertenece la imagen.

$$Chl = 165,71 \cdot gNDVI - 51,6 \quad (2)$$

$$MSI = SWIR/NIR \quad (3)$$

$$L = R + G + (B/3) \quad (4)$$

$$NDVI = (NIR-R) / (NIR+R) \quad (5)$$

De forma que gNDVI es el Green NDVI definido por Gitelson *et al.* (1996), R, G y B son las bandas del rojo, verde y azul respectivamente, NIR se corresponde con la banda del infrarrojo cercano, y, SWIR es la banda del infrarrojo de onda corta (15500-17500Å).

Para la obtención del modelo especificado en la Ec. 1 y una vez tenidos en cuenta los datos publicados por Ferrara *et al.* (1998), Higuera *et al.* (2003, 2013) y Millán *et al.* (2007) se efectuó una calibración de los mismos en base a los valores de las variables climáticas básicas existentes en la fecha a la que correspondía cada imagen, obteniéndose que la precipitación era la única variable climática capaz de dar consistencia al modelo, probablemente debido al fenómeno de deposición húmeda especificado por Gustin *et al.* (2008). De forma similar, el

TABLA I
IMÁGENES SATÉLITES UTILIZADAS

Sensor	Fecha	Sensor	Fecha
Landsat 4 TM	26 Mayo 1991	Landsat 5 TM	30 Mayo 2007
Landsat 4 TM	13 Julio 1991	Landsat 5 TM	01 Julio 2007
Landsat 7 ETM+	10 Julio 1999	Landsat 5 TM	09 Agosto 2007
Landsat 7 ETM+	19 Junio 2000	Landsat 5 TM	10 Septiembre 2007
Landsat 7 ETM+	09 Octubre 2000	Landsat 5 TM	05 Octubre 2007
Landsat 7 ETM+	06 Junio 2001	Landsat 5 TM	20 Junio 2009
Landsat 5 TM	17 Junio 2002	Landsat 5 TM	23 Agosto 2009
Landsat 5 TM	06 Julio 2003	Landsat 5 TM	24 Septiembre 2009
Landsat 5 TM	10 Octubre 2003	Landsat 5 TM	22 Mayo 2010
Landsat 7 TM	10 Diciembre 2003	Landsat 5 TM	09 Mayo 2011
Landsat 5 TM	19 Noviembre 2006	Landsat 5 TM	28 Julio 2011
Landsat 5 TM	21 Diciembre 2006	Landsat 8 LC8	30 Mayo 2013
Landsat 5 TM	06 Enero 2007	Landsat 8 LC8	04 Julio 2014
Landsat 5 TM	11 Marzo 2007	Landsat 8 LC8	28 Enero 2015
Landsat 5 TM	14 Mayo 2007	Landsat 8 LC8	20 Mayo 2015

índice MSI, además de actuar como covariable muy significativa en el modelo, refuerza la solidez del mismo en base al régimen pluviométrico existente a lo largo del año meteorológico medio (1971-2000; Figura 2).

Teniendo presente la correlación entre los datos publicados ya referidos con los predichos por el modelo expuesto (Figura 3), se obtuvo que los mismos fueron suficientemente significativos ($\leq 0,05$) como para utilizar el modelo especificado en la Ec. 1.

Tal y como se puede observar en la Figura 3, el 87,5% de los datos de mercurio atmosférico medidos en el área de estudio, se encuentran comprendidos entre 7,5 y 100 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, ambos inclusive, lo que apunta a que los trabajos de restauración efectuados entre 2006 y 2008, han dado como resultado una

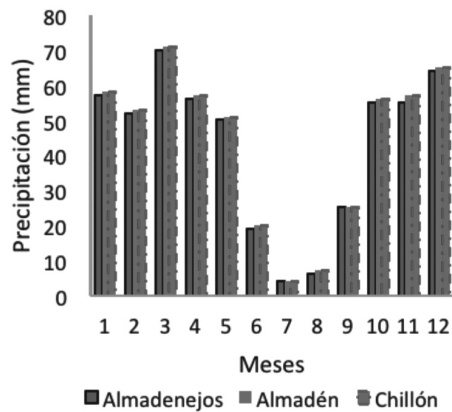


Figura 2. Año meteorológico medio (1971-2000) de las zonas de muestreo.

mejora sustancial de la calidad ambiental en el distrito de Almadén, que unido a las políticas de conservación ambiental dictadas por el gobierno autonómico y nacional, así como a la presencia de un clima favorable (tipo Csa, con temperatura media anual de 15,3°C, máxima y mínima medias de 21,6 y 9,1°C, precipitación media anual de 520mm y 2664h de sol al año), han propiciado el aumento progresivo del número de turistas alrededor de las infraestructuras minero-industriales construidas en el seno del propio distrito de Almadén.

En otro orden de temas (Figura 4), parece existir una variación estacional de los niveles atmosféricos de mercurio, los cuales prácticamente tienen niveles similares en primavera, otoño e invierno (78,17; 73,17 y 62,13 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente), mientras que en verano, estación con precipitación media de 30,33mm y, temperatura acumulada media

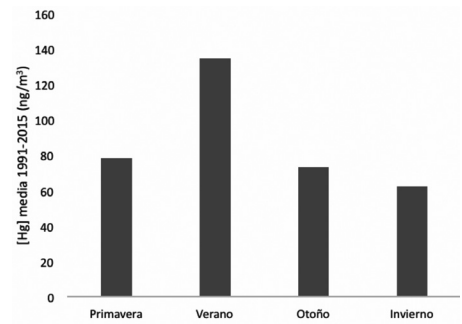


Figura 4. Valores medios, por estación anual, de mercurio atmosférico durante el periodo de estudio.

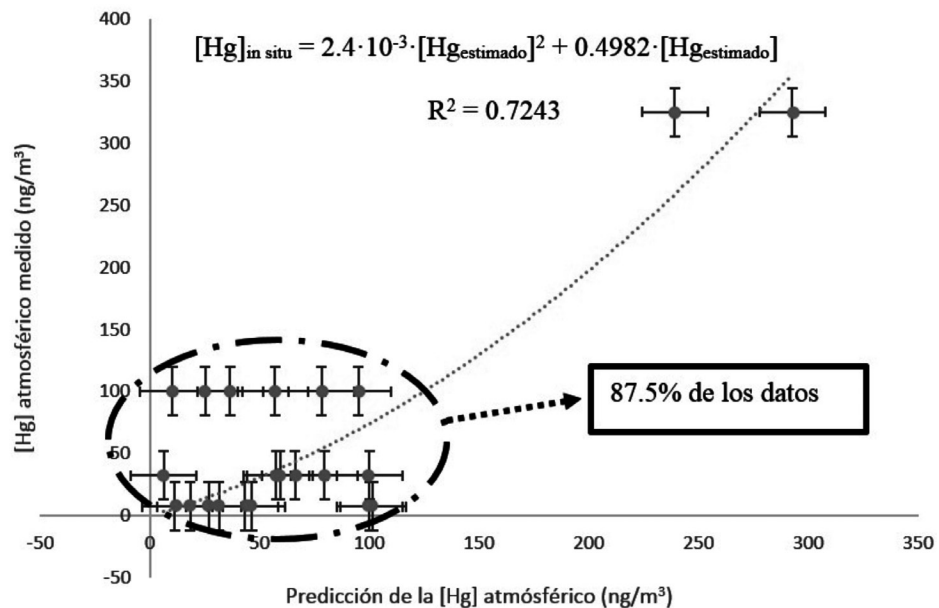


Figura 3. Curva de ajuste entre los datos medidos in situ y los pronosticados.

de 74,40°C (coeficiente de correlación de Pearson $r = -0,91$ entre ambas variables), con valores medios de mercurio atmosférico de 134,66 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$, es la escasa humedad relativa, a través de la precipitación media, la que favorece de alguna manera un proceso, al que llamaremos fenómeno de volatilización por acumulación térmica (FVAT). Gracias a este proceso el mercurio, aun cuando no exista en el ambiente a la temperatura a partir de la cual pasa a gas, es capaz de cambiar de estado siempre y cuando haya acumulado la suficiente energía térmica. La ecuación para conocer si el FVAT es posible ($\text{FVAT} \geq 40^\circ\text{C}$) o no ($\text{FVAT} < 40^\circ\text{C}$), es:

$$\text{FVAT} = \sum (T_{\text{mpc}} - T_{\text{umbral}}) \quad (6)$$

Teniendo presente que si $T_{\text{mpc}} < T_{\text{umbral}}$, entonces $(T_{\text{mpc}} - T_{\text{umbral}})$ es igual a cero, y siendo T_{mpc} ($^\circ\text{C}$) la temperatura media, estadísticamente significativa para un periodo de 30 años, correspondiente al periodo de tiempo en el que se desea ver si se produce o no el FVAT (por ejemplo, para el municipio de Almadenejos, esta temperatura sería de 8,3°C para el mes de febrero), T_{umbral} ($^\circ\text{C}$) no es otra cosa que la temperatura diaria (temperatura media) u horaria (temperatura real correspondiente al momento temporal correspondiente) existente en cada día u hora en la que se quiere calcular el FVAT. Por ejemplo, teniendo en cuenta las predicciones climáticas para la cuarta semana de febrero de 2016 en Almadenejos, obtenemos que la temperatura media diaria sería, desde el lunes 22 de febrero hasta el domingo 28 de febrero, de 8,5; 8,5; 8,5; 8,5; 9; 9,5 y 9,5°C respectivamente). Si resolvemos el ejemplo expuesto mediante la Ec. 6, se obtendría:

$$\begin{aligned} \text{FVAT} &= (8,3-8,5) + (8,3-8,5) + (8,3-8,5) + \\ &+ (8,3-8,5) + (8,3-9) + (8,3-9,5) + (8,3-9,5) \\ &= 0 < 40^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Según lo expuesto, no se producirá FVAT en la cuarta semana del mes de febrero de 2016 en el municipio de Almadenejos y, por tanto, no habrá incremento de la concentración de mercurio atmosférico en dicho periodo temporal como consecuencia de este fenómeno.

Es evidente, que la asunción del modelo propuesto y del FVAT es de gran importancia a la hora de monitorear el posible riesgo potencial que ocasionaría el aumento de la concentración de mercurio atmosférico, y por ello, de gran interés de cara al mantenimiento ambiental sostenible y del desarrollo turístico del distrito.

Desde el punto de vista de la ordenación del territorio, el desar-

rollo y evolución medioambiental del distrito y del municipio de Almadén ha permanecido fiel a su trama base histórica, que aunque basada en la minería del mercurio ha permitido la evolución eco-sostenible de sus ámbitos rural y urbano mediante el mantenimiento de las relaciones intrínsecas imperantes entre ellos y con el medioambiente circundante. No cabe duda que todo esto ha repercutido y redundará positivamente en el desarrollo económico del distrito, que aunque puede ser considerado como lento en términos relativos, es adecuado en términos absolutos, dado el número de habitantes del mismo, así como la relación entre el número de turistas y habitantes en cuanto al nivel de gasto que los primeros efectúan. A su vez, de igual modo hay que tener presente la existencia de la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén, punto de referencia en todo lo relacionado con la minería del mercurio y el desarrollo de la región, y sin la cual, probablemente, no hubiera sido posible el actual desarrollo eco-sostenible de Almadén.

Conclusiones

La metodología propuesta en el presente trabajo provee una herramienta útil para efectuar el monitoreo anual, a través de imágenes teledetectadas, no solo en la zona de estudio, sino también en cualquier otra donde existan problemas similares referentes a la concentración atmosférica del mercurio y a su efecto sobre la salud o el desarrollo de turismo minero-industrial.

Igualmente, cabe comentar la importancia del hallazgo que hemos denominado FVAT, ya que permite comprender mejor la dinámica del mercurio en el medio y por tanto, la razón por la que las concentraciones de éste elemento aumentan en ciertos momentos del año. Los resultados a este respecto indican la importancia de los bajos niveles tanto de precipitación como de humedad relativa ambiental en el aumento de la cantidad de mercurio atmosférico por unidad de volumen, que aunque se puede pensar que es desfavorable de cara a la sostenibilidad ambiental, no lo es debido a los bajos niveles existentes en el área sometida a estudio.

Por ello puede ser considerado como crítico estimar el efecto acu-

mulativo de la temperatura en el sistema. Sin embargo, la dimensión temporal en la que las variables climáticas pueden ser pronosticadas es todavía demasiado corta, motivo por el que el monitoreo continuo de las mismas es de vital importancia, sobre todo en aquellas áreas donde aún prevalezcan actividades relacionadas con la minería del mercurio.

Es evidente que tanto el distrito como el municipio de Almadén, son zonas del planeta donde la integración de información a través de sistemas de información geográfica es de importancia de cara a la confección de índices de decisión y control ambiental, que de forma similar al FVAT permitan realizar análisis espaciales y, elaborar mapas de control interactivos de gran utilidad para la comunidad científica internacional.

El municipio de Almadén goza en la actualidad de una gran salud medioambiental, con niveles de mercurio atmosférico controlados y mantenidos por debajo de los límites establecidos por la normativa vigente, lo que unido a su buen clima y a su importante infraestructura turístico-industrial, hace posible una evolución eco-sostenible del territorio, convirtiendo a Almadén en un bastión de referencia a nivel mundial.

REFERENCIAS

- Chuvieco E (2010) *Teledetección Ambiental. La Observación de la Tierra desde el Espacio*. Ariel. Madrid, España. 608 pp.
- Ferrara R, Maserti BE, Andersson M, Edner H, Ragnarson P, Svanberg S, Hernandez A (1998) Atmospheric mercury concentrations and fluxes in the Almaden district (Spain). *Atmos. Environ.* 32: 3897-3904.
- Gitelson AA, Kaufman YJ, Merzlyak MN (1996) Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Rem. Sens. Environ.* 58: 289-298.
- Gustin MS, Lindberg SE, Weisberg PJ (2008) An update on the natural sources and sinks of atmospheric mercury. *Appl. Geochem.* 23: 482-493.
- Higuera P, Oyarzun R, Biester H, Lillo J, Lorenzo S (2003) A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almadén mining district, Spain. *J. Geochem. Explor.* 80: 95-104.
- Higuera P, Esbrí JM, Oyarzun R, Llanos W, Martínez-Coronado A, Lillo J, López-Berdonces MA, García-Noguero EM (2013) Industrial and natural sources of gaseous elemental mercury in the Almadén district (Spain): an updated report on this issue after the ceasing of mining and metallurgical activities in 2003 and major land reclamation works. *Environ. Res.* 125: 197-208.
- Lagouarde JP, Hénon A, Kurz B, Moreau P, Irvine M, Voogt J, Mestayer (2010) Modelling daytime thermal infrared directional anisotropy over Toulouse city center. *Rem. Sens. Environ.* 114: 87-105.
- Ma J (2009) Single-pixel remote sensing. *IEEE Geosci. Rem. Sens. Lett.* 6: 199-203.
- Millán R, Carpena RO, Schmid T, Sierra MJ, Moreno E, Peñalosa J, Gamarra R, Esteban E (2007) Rehabilitación de suelos contaminados con mercurio: estrategias aplicables en la zona minera de Almadén. *Ecosistemas* 16(2): 56-66.
- Nasr AH, Ramadan TM (2008) Data fusion using HIS transformations for exploring ore deposits in northeastern part of the Saharan Metacraton. *Int. Arch. Photogram. Rem. Sens. Spat. Inf. Sci.* 37(B7): 1119-1123.
- Stoker P, Rothfeder R, Dudley K, Dennison P, Buchert M (2017) Comparing the utility of LIDAR data vs. multi-spectral imagery for parcel scale water demand modeling. *Urban Water J.* 14: 331-335.
- Pohl C, Van Genderen JL (1998) Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *Int. J. Rem. Sens.* 19: 823-854.
- Qihao W, Quattrochi Dale A, Carlson Toby N (2012) Remote sensing of urban environmental: Special issue. *Rem. Sens. Environ.* 117: 1-2.
- Ramírez-Juidías E (2013) Study of Seville as sustainable city using remote sensing. En *Proc. 1st Int. Congr. Sustainable Construction and Eco-efficient Solutions*. Universidad de Sevilla. España. pp. 375-386.
- Ramírez-Juidías E, Pozo-Morales L, Galán-Ortiz L (2015) Procedimiento para la obtención de una imagen teledetectada a partir de fotografía. Patente N° ES2537783B2 (29/09/2015), extensión internacional PCT-WO2014198974. Universidad de Sevilla, España.
- Ramírez Juidías E, Tejero Manzanares J, Mata Cabrera F, Hanafi I (2014) La teledetección como elemento de aprendizaje de la historia de la ingeniería y el patrimonio industrial: el caso de Almadén. En *Innovación Educativa de las Enseñanzas Técnicas Vol. I*. Universidad Castilla La Mancha (Ed.). Ciudad Real, España. pp. 167-181.
- Sobrino JA, Oltra-Carrió R, Sòria G, Bianchi R, Paganini M (2012) Impact of spatial resolution and satellite overpass time on evaluation of the surface urban heat island effects. *Rem. Sens. Environ.* 117: 50-56.
- Soudani K, François C (2014) Remote sensing: a green illusion. *Nature* 506: 165-166.
- Tejero J (2011) *Evolución Histórico-Tecnológica de los Hornos en la Metalurgia del Mercurio en las Minas de Almadén: Implantación de los Hornos Cermak-Spirek y Spirek*. Tesis. Universidad de Córdoba. España. 845 pp.

ENVIRONMENTAL STUDY OF THE MUNICIPALITY OF ALMADEN USING REMOTE SENSING

Emilio Ramírez-Juidías and Jesús Yanes-Figueroa

SUMMARY

The municipality of Almaden, Ciudad Real, Spain, declared a World Heritage site on June, 2012, is a good example of mutual relationship of sustainability between the eco-design of its urban pattern and its historical and industrial heritage, giving rise to a very peculiar landscape evolution. This, linked to its cultural richness, has resulted in a strong tourist attraction. In this study, 30 Landsat satellite images from the U.S. Geological Services were analyzed for a period of 25 years (1991-2015). Each was examined and classified in a certain period of time in order to characterize the

landscape integration of the different heritage assets both spatially and temporally. Results show how the environmental sustainability of the city allows recognizing and evaluating the different changes in land use in relation to the time at which restoration work was carried out in study area, before (1991-2005), during (2006-2008) and after (2009-2015) it, and its intrinsic relationship with mercury mining and eco-sustainable development of Almadén. The sustainability of Almaden is directly related to both the low levels of precipitation and relative humidity.

ESTUDO AMBIENTAL DO MUNICÍPIO DE ALMADÉN COM TELEDETECÇÃO

Emilio Ramírez-Juidías e Jesús Yanes-Figueroa

RESUMO

O município de Almadén, Ciudad Real, Espanha, declarada Património Mundial em junho de 2012, é um exemplo claro de relação mútua de sustentabilidade existente entre o eco-design do seu tecido urbano e do seu património histórico e industrial, originando uma evolução da paisagem muito peculiar. Isso, juntamente com a sua riqueza cultural, tem provocado uma forte atração turística. Neste estudo, foram analisados um total de 30 imagens de Landsat do U.S. Geological Service por um período de 25 anos (1991-2015), mas cada uma das quais foi examinada e classificada em um determinado período de tempo, a fim de ca-

racterizar adequadamente a integração paisagem tanto espacialmente e temporalmente. Os resultados mostram que a sustentabilidade ambiental da cidade pode reconhecer e avaliar os diferentes mudanças no uso do solo, em relação ao momento em que o trabalho de restauração da área de estudo foram realizadas, antes (1991-2005), durante (2006-2008) e depois (2009-2015) do mesmo, e sua relação intrínseca com a mineração de mercúrio e desenvolvimento eco-sustentável de Almadén. A sustentabilidade de Almadén está diretamente relacionada com baixos níveis de precipitação e umidade relativa do ambiente.