# Vigilancia inteligente del agua: herramientas de *computer vision* e inteligencia artificial para combatir delitos ambientales

Los crímenes ambientales tienen un claro impacto en la salud pública y medioambiental. Su detección y persecución continúa siendo un desafío para las autoridades competentes. Para enfrentarlo, nace Emeritus, un proyecto financiado por la Unión Europea (UE) que desarrolla un protocolo efectivo para investigar delitos ambientales mediante tecnologías avanzadas como satélites, drones e inteligencia artificial (IA). Un consorcio de 20 socios de cinco países colabora en la creación de una plataforma de geointeligencia y un protocolo especializado. El proyecto se estudia en diversos escenarios, desde monitoreo de contaminación del agua hasta detección de vertidos ilegales de residuos. Cetaqua lidera el caso de contaminación de masas de agua, desarrollando herramientas con visión por computador e IA. El objetivo final es implementar una plataforma efectiva para combatir estos delitos en casos de uso reales.

**Palabras clave**

Crímenes ambientales, contaminación de aguas superficiales, visión por computación, inteligencia artificial, detección temprana de eventos.

## SMART WATER MONITORING: COMPUTER VISION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE TOOLS TO COMBAT ENVIRONMENTAL CRIMES

*Environmental crimes have a clear impact on public health and the environment. Their detection and prosecution continues to be a challenge for competent authorities. To address this, Emeritus was born, an EU-funded project that develops an effective protocol to investigate environmental crimes using advanced technologies such as satellites, drones, and artificial intelligence (AI). A consortium of 20 partners from five countries collaborates in creating a geointelligence platform and specialized protocol. The project is being tested in various scenarios, from water pollution monitoring to illegal waste site detection. Cetaqua leads the water pollution case, developing tools with computer vision and AI. The ultimate goal is to implement an effective platform to combat these crimes in the real world.*

**Keywords**

*Environmental crimes, surface water pollution, computer vision, artificial intelligence, early event detection.*

**Meritxell Valentí Quiroga**
*project manager* e investigadora en Cetaqua - Centro Tecnológico de Agua

**Laura Bonastre Farran**
*project manager* e investigadora en Cetaqua - Centro Tecnológico de Agua

**Carlos Carmona Vázquez**
*project manager* y líder del programa Virtualización de Servicios en Cetaqua - Centro Tecnológico de Agua

**Bernat Joseph Duran**
*project manager* e investigador en Cetaqua - Centro Tecnológico de Agua

**Ricardo Fernández Campos**
oficial del Grupo de Informática y Telecomunicaciones de la Policía Local de Málaga

**José Francisco Negrete Berlanga**
policía del Grupo de Informática y Telecomunicaciones de la Policía Local de Málaga

## 1. INTRODUCCIÓN

Los crímenes ambientales son una problemática creciente a nivel mundial que afecta de forma directa al medio ambiente. Los principales delitos relacionados con residuos engloban vertederos ilegales de residuos (incluyendo entierro, almacenamiento, depósito o quema), exportación ilegal de residuos, clasificación errónea y actividades fraudulentas, y violaciones de licencias o permisos. Todas estas actividades contribuyen al calentamiento global, a la pérdida de hábitats naturales y extinción de especies, y desestabilizan comunidades y economías fomentando la corrupción y deteriorando su seguridad y desarrollo (Lundh, 2024).

Actualmente en la Unión Europea (UE) hay identificadas numerosas redes criminales organizadas especializadas en vertidos de residuos, contaminación y ataques a la vida silvestre, siendo esta la cuarta actividad criminal en el mundo, llegando a costar alrededor de 258 billones de USD anuales (European Union Agency for Criminal Justice Cooperation, 2021). La naturaleza transnacional del delito ambiental propicia que este tipo de actividad se haya convertido en una industria lucrativa para el crimen organizado.

A pesar de que en los últimos años se han establecido nuevas restricciones y prohibiciones, los delitos relacionados con residuos generalmente ocurren debido a varios factores en la industria de residuos: marcos regulatorios complejos, múltiples puntos de transferencia de residuos (incluyendo movimientos transfronterizos) y poca inspección a nivel de campo, entre otros. Si bien el crimen organizado es cada vez más frecuente en este sector, aún existen importantes brechas de conocimiento sobre los actores criminales clave.

» Emeritus es un proyecto europeo que busca desarrollar y poner en práctica un protocolo para facilitar las investigaciones de delitos ambientales, entre ellos de contaminación de aguas, a través de tecnologías de vanguardia

Las Agencias de Aplicación de la Ley (*Law Enforcement Agencies*, LEA), Guardias Fronterizos (*Border Guards*, BG) y otras autoridades relevantes continúan trabajando para enfrentar estos desafíos. Por ejemplo, para el caso de contaminación de masas de agua superficiales, los protocolos más convencionales de detección de vertidos y seguimiento de calidad del agua se basan en mediciones realizadas de forma periódica (generalmente, mensuales) lo que puede resultar insuficiente para detectar episodios puntuales de contaminación.

Si bien la implementación de sensores de monitorización continua surge como alternativa, estos sistemas implican altos costes de instalación y mantenimiento, requieren calibraciones periódicas y deben ubicarse en zonas protegidas para evitar daños o hurtos. Estas limitaciones, sumadas a la dedicación que requieren, hacen que su aplicación sea restringida. No obstante, las tecnologías emergentes como satélites, cámaras, drones e inteligencia artificial, junto con capacidades avanzadas de integración de datos, ofrecen soluciones más eficientes para la vigilancia integral de extensas áreas geográficas, independientemente de su accesibilidad o nivel de riesgo, constituyendo herramientas valiosas para la detección de delitos ambientales.

Para abordar esta problemática, el proyecto Emeritus (*Environmental crimes' intelligence and investigation protocol based on multiple data sources*), es un proyecto financiado por la Unión Europea (Horizon-CL3-2021-FCT-01) que empezó en septiembre 2022 y tiene previsto terminar este agosto de 2025, busca desarrollar y poner en práctica un protocolo para facilitar las investigaciones de delitos ambientales. La misión de Emeritus es demostrar cómo tecnologías de vanguardia en monitoreo y análisis (incluyendo drones, satélites, sensores virtuales y datos de geointeligencia) pueden mejorar la eficiencia en la detección de delitos ambientales, optimizar la asignación de recursos mediante perfiles de riesgo inteligentes, minimizar los riesgos para los operadores y disuadir la actividad criminal. El proyecto busca empoderar a las LEAs y BGs para tomar medidas proactivas en la captura de criminales y la interrupción de actividades ilegales en etapas tempranas.

El consorcio Emeritus reúne a ocho autoridades policiales y fronterizas de cinco países, junto con expertos en seguridad, capacitación y socios tecnológicos como Cetaqua, para desarrollar colaborativamente un protocolo de investigación específico para delitos ambientales. La validación de la plataforma y el protocolo se realiza mediante simulaciones basadas en cuatro casos de uso realistas de diferente complejidad, utilizando sitios de demostración dedicados y las instalaciones de los socios, con el objetivo final de desarrollar recomendaciones para autoridades políticas y mejorar la toma de decisiones.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. LA METODOLOGÍA DEL EMERITUS

La metodología general de trabajo del proyecto involucra cuatro etapas interconectadas (**Figura 1**).

Para validar sus tecnologías y metodologías, en el proyecto Emeritus se han seleccionado cuidadosamente cuatro casos de uso que reflejan escenarios del mundo real en los cuales se prueban tanto la plataforma como el protocolo durante actividades de capacitación con el objetivo de evaluar resultados e impactos.

Para integrar la integración de cada caso de uso en la plataforma Emeritus, se siguen cinco pasos clave:

- Traducir el caso de uso en bloques de construcción de la plataforma.
- Configurar y adaptar los componentes de la plataforma.
- Integrar componentes tecnológicos específicos.
- Probar y validar resultados y accesibilidad.
- Implementar ajustes periódicos del sistema basados en la retroalimentación de los usuarios.

### 2.2. CASOS DE USO

Se han seleccionado cuatro casos de uso (UC) de complejidad creciente y características únicas para probar tanto la plataforma como el protocolo durante las actividades de capacitación, para generar resultados e impactos específicos:

- UC1 - Contaminación del agua: detección, predicción y localización de puntos de descarga para análisis de delitos.
- UC2 - Monitoreo de centros de almacenamiento de residuos, incluyendo materiales peligrosos.

**FIGURA 1.** Etapas metodológicas del proyecto.

- UC3 - Tráfico ilegal transfronterizo de residuos, detección de almacenamiento y vertido ilegal de residuos.
- UC4 - Identificación de sitios ilegales de residuos y sitios térmicos (incendios).

Este artículo se centra en la metodología y resultados obtenidos en el caso de uso 1 relacionado con la contaminación del agua, más concretamente aguas fluviales del río Guadalhorce.

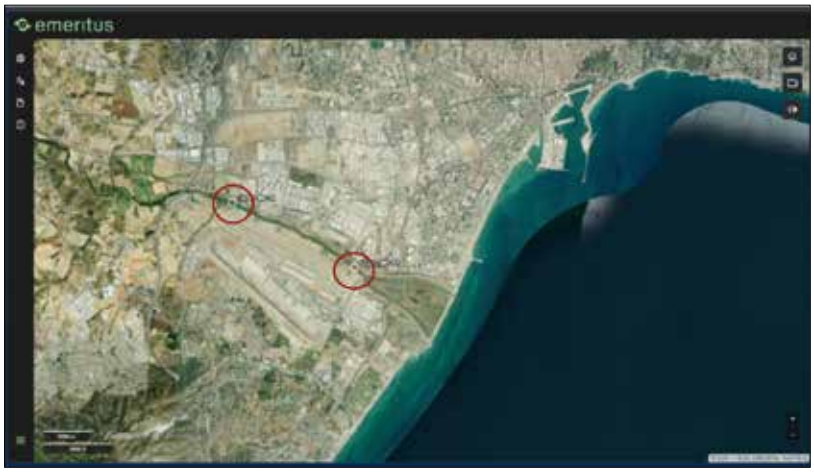
#### 2.2.1. Contaminación de aguas fluviales

Cetaqua, como centro de investigación especializado en tecnología del agua, lidera el caso de uso de detección de contaminación de aguas de cursos fluviales, cuyo objetivo se basa en hacer una detección temprana de la contaminación de masas de agua y predecir la ubicación de puntos de descarga para ayudar en el análisis de delitos. Aprovechando su experiencia, Cetaqua está desarrollando un sistema que utiliza sensores comerciales y el análisis de imágenes para crear una herramienta basada en visión por computadora para la detección temprana de vertidos en cuerpos de agua, estimar su origen y calcular su tiempo de viaje hasta el Paraje Natural del Guadalhorce (Málaga).

El Guadalhorce, el río más largo de la provincia de Málaga, desemboca en el Mar Mediterráneo a través de dos ramales, entre los cuales se encuentra un humedal natural que forma el Paraje Natural del Guadalhorce. A pesar de su estatus protegido, la zona sufre ocasionalmente vertidos ilegales debido a su proximidad a zonas industriales, lo que provoca frecuentes plumas de contaminación. Esta región natural protegida está salvaguardada por el Grupo de Protección de Naturaleza (GRUPRONA) de la Policía Local de Málaga. La coordinación entre Cetaqua y esta unidad es fundamental en el proyecto Emeritus, estableciendo una sinergia que les permite disponer de datos en tiempo real para reaccionar rápidamente ante la detección de vertidos ilegales, y una comprensión profunda del caso de estudio que permite a Cetaqua refinar y personalizar las herramientas desarrolladas.

En definitiva, la contribución metodológica de Cetaqua al proyecto Emeritus implica el desarrollo de un sistema innovador de detección que utiliza tecnologías novedosas de IA (combinando algoritmos, cámaras de visión, y sensores hidráulicos) y que permite la detección de eventos de contaminación en tiempo real y la clasificación en base a tipos y fuentes de contaminantes, así como identificar a las posibles partes responsables y localizar las fuentes de vertidos ilegales.

**FIGURA 2.** Localización de las dos estaciones de monitoreo en el río Guadalhorce (UC1).




### 2.2.2. Las herramientas desarrolladas

Para investigar el escenario mencionado anteriormente se están desarrollando dos herramientas diferentes para, por un lado, proporcionar un sistema de alerta para la detección de vertidos de agua en aguas superficiales y, por el otro, investigar el punto y el momento del vertido. A nivel de infraestructura, el desarrollo de ambas herramientas requiere de la instalación de dos estaciones de monitoreo ubicadas en dos puntos del río Guadalhorce (**Figura 2**) cercanos a la zona de desembocadura del río.

Ambas estaciones están compuestas por una configuración relativamente simple: una cámara, un panel solar para cargar baterías de forma autónoma, una paleta de colores, sensores de nivel y conexión eléctrica e internet (**Figura 3**).

Un punto diferencial de estas herramientas es que son métodos no invasivos para determinar cambios indirectos en el estado de la calidad del agua y que permiten el monitoreo en áreas remotas o regiones de difícil acceso donde mantener sondas o instrumentos para análisis periódicos puede ser tedioso. El objetivo final pues, no es tener información precisa sobre las mediciones de calidad del agua, sino tener un sistema de alerta temprana capaz de detectar rápidamente cambios en las superficies de agua probablemente causados por un vertido ilegal e informar a las autoridades.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. DESARROLLO DEL SISTEMA DE ALERTA

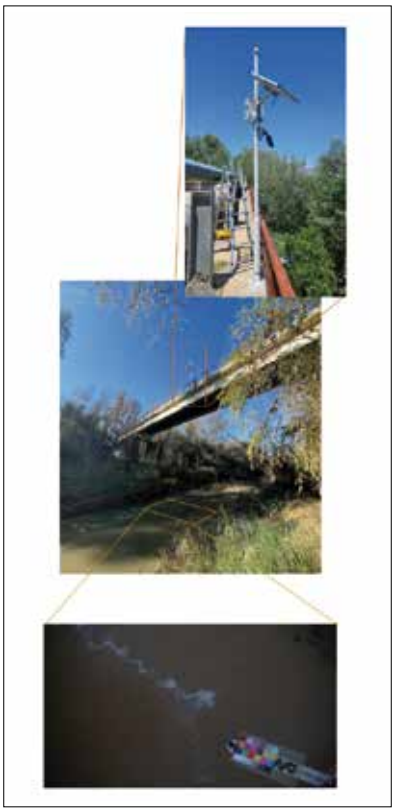
La primera herramienta busca conseguir un sistema de alerta para la detección de vertidos a partir de monitorear el agua en tiempo real utilizando tecnología de visión por computadora (CV).

La cámara de la estación toma imágenes cada 5 minutos, y se aplican a estas varios algoritmos de CV para procesarlas. El primer paso es realizar la corrección del color usando una paleta de colores para eliminar las interferencias ambientales producidas durante distintas horas de luz del día. La calibración de los modelos implica analizar imágenes durante un cierto período para definir las condiciones 'normales' de calidad del agua del Guadalhorce, basándose en las propiedades ópticas representadas en las imágenes. Para determinar si hay un evento de contaminación, se han integrado cuatro modelos de CV para evaluar: el porcentaje de agua, presencia de espumas, color dominante y nivel de turbidez.

#### 3.1.1. Determinación del porcentaje de agua y espumas

La aparición de espumas puede ser indicativo de un vertido. Tanto

**FIGURA 3.** Estación de monitoreo aguas arriba en el río Guadalhorce.



la determinación del porcentaje de agua como de espumas se realizan aplicando modelos de segmentación. Estos modelos han sido previamente entrenados con máscaras de segmentación manual para posteriormente poder automatizarse. A modo de resultado final, las imágenes post-procesadas contienen la cantidad (en porcentaje) de agua o espuma presente (**Figura 4**).

### 3.1.2. Color dominante y turbidez

Otro punto clave para la detección de vertidos, es la determinación de cambios de color del agua sueprficial. Para ello, es necesario determinar el color dominante y poder identificar cualquier variación de este. Como se ha mencionado previamente, un paso crucial es la corrección previa de las imágenes (**Figura 5**) para eliminar interferencias ambientales. En este caso se ha probado aplicando dos enfoques diferentes basados en tarjetas de color: una corrección HSV (H: matiz (tipo de color), S: saturación y V: valor) usando una paleta de colores; y una corrección de exposición usando una paleta más sencilla de balance blanco-negro. Ambos enfoques funcionaron exitosamente en la corrección de imágenes. Una vez hecha la corrección, se aplica un modelo de CV para determinar el color predominante, basado en estadísticas propias de las imágenes del caso de estudio particular.

En el caso de la turbidez, se ha entrenado un modelo de CV usando un algoritmo GPT para clasificar cuatro rangos diferentes de turbidez que van desde bajo (0-15 NTU) hasta muy alto (>135 NTU) en base a un histórico de mediciones realizadas previamente con un turbidímetro convencional.

**FIGURA 4.** Imagen procesada después de la segmentación con el porcentaje de espuma presente (88%).

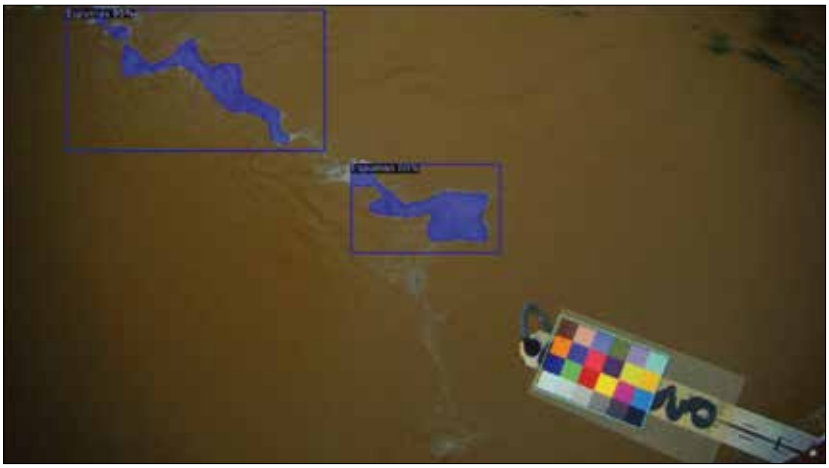
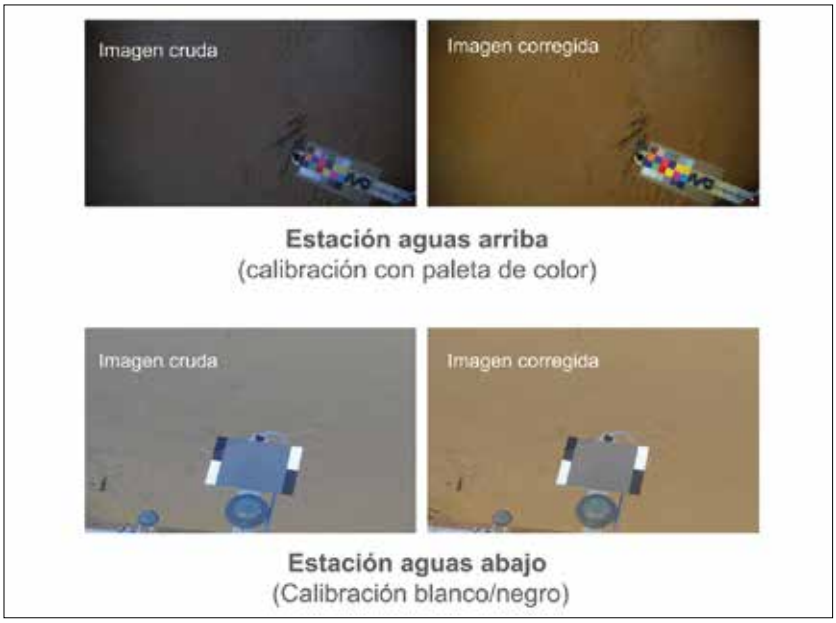


**FIGURA 5.** Imágenes pre y post corrección utilizando diferentes aproximaciones.



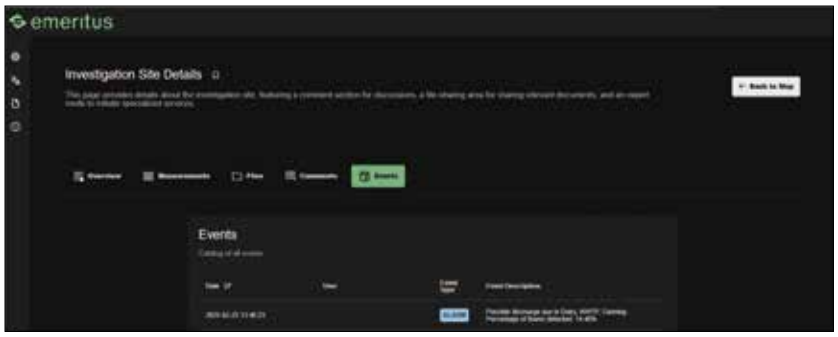

## 3.2. INVESTIGACIÓN DEL PUNTO Y EL MOMENTO DEL VERTIDO

La segunda herramienta tiene como objetivo investigar el punto y el momento de un vertido concreto. En este caso se requiere disponer de la información de ambas estaciones de monitoreo, ubicadas a lo largo del curso del Guadalhorce.

Esta herramienta utiliza un modelo de aprendizaje automático basado en simulaciones de la hidráulica fluvial que estima el tiempo que tarda un vertido detectado en la primera estación en llegar a la región protegida (segunda estación). En este caso, en lugar de entrenar los modelos con mediciones minuto a minuto de la calidad del agua tomadas de sensores en línea - que generalmente requieren mucho tiempo de mantenimiento - el modelo se entrena con las imágenes tomadas por las cámaras cada cinco minutos.

Así, combinando los resultados de este flujo de trabajo establecido, cuando se detecta una situación fuera de la normalidad particular

**FIGURA 6.** Registro de eventos de contaminación de la plataforma Emeritus.




del río, se activa una alarma y se notifica a las autoridades pertinentes con los detalles de los modelos evaluados identificando también una posible fuente de vertido, generando un registro de eventos en la plataforma (**Figura 6**) .

## 4. CONCLUSIONES

La persecución de crímenes ambientales es todavía un reto para las autoridades responsables. Disponer de protocolos consensuados de actuación y herramientas novedosas que permitan su detección, incluso en sitios remotos, es crucial para hacerles frente. En este sentido, herramientas de *computer vision* como las desarrolladas dentro del marco del proyecto Emeritus capaces de identificar variaciones en la calidad de las aguas superficiales en base a propiedades visuales como cambios de color, formación de espumas, o incremento de turbidez, pueden ser altamente beneficiosas para dar alarma y detectar posibles vertidos en áreas críticas y de difícil acceso.

En última instancia, el proyecto Emeritus pretende maximizar los impactos y beneficios de dichas estrategias trabajando de la mano de socios y partes interesadas para asegurar que los recursos generados se presentan en un formato accesible y útil para combatir este tipo de delitos.

**Bibliografía**

[1] Lundh, C.O. (2024). The Revised EU Environmental Crime Directive : Changes and Challenges in EU Environmental Criminal Law with Examples from Sweden. Eucrim – the European Criminal Law Associations Forum. págs 164-172. https://doi.org/10.30709/eucrim-2024-013.

[2] European Union Agency for Criminal Justice Cooperation. (2021). Report on Eurojust's casework on environmental crime. In Eurojust's Casework on Environmental Crime, págs 1-4 [Report]. https://www.eurojust.europa.eu/sites/default/files/assets/report_environmental_crime.pdf.

[3] United Nations Office on Drugs and Crime (2025). Report on UNDOC Approach to crimes in the waste sector [Report] https://www.unodc.org/res/environment-climate/resources_html/UNODC_Approach_to_Crimes_in_the_Waste_Sector.pdf .