

Técnicas basadas en imágenes de video para cuantificar variables ambientales en zonas costeras

Andrés F. Osorio¹, Juan C. Pérez¹⁻², Cristian A. Ortiz¹ & Raúl Medina³

*1. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
afosorioar@unal.edu.co*

2. Escuela de Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

3. Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria (GIOC), España.

Recibido para evaluación: 30 de Agosto de 2007 / Aceptación: 18 de Septiembre de 2007 / Versión Final: 8 de Octubre de 2007

Resumen

La falta de información es uno de los principales problemas identificados en las investigaciones y cuando se pretende realizar adecuadas gestiones sobre los recursos naturales. Para enfrentar estos retos han surgido metodologías innovadoras basadas en técnicas de tratamiento de imágenes, las cuales poseen grandes ventajas frente a los métodos tradicionales. En este artículo se hace un breve recuento sobre el estado del arte y su aplicación en el ámbito costero. Se presenta, en forma general, la estructura de los sistemas de video 2D, sus características, su proceso de calibración y una aproximación al manejo matemático de dichas imágenes. Además, se hace una breve introducción al post-procesamiento de las imágenes con el fin de transformar la información cualitativa en cuantitativa. De esta forma, los investigadores pueden entender mejor los procesos naturales y así obtener indicadores ambientales que permitan a los gestores tomar decisiones.

Palabras Clave: Sistemas de Video; Procesamiento de Imágenes; Gestión de Costas; Calibración de Cámaras.

Abstract

One of the main problems identified by several researchers and managers with action on the natural resources is the availability of suitable data. In this way, the use of novel techniques based on image processing has increased during the last decade; they have many advantages with respect to the traditional methods. This paper provides a critical review of the monitoring systems based on images and its application in the coastal scope. The structure of the 2D video systems is explained, its characteristics, the calibration process and an approach to the mathematical relationship between the image and the real world. In addition, this paper presents a brief introduction to the post-processing in order to transform the qualitative information into quantitative data. Hence, the researchers can understand better the natural processes and the managers to obtain environmental indicators that help in the management of the resources.

Key Words: Video System; Image Processing; Coast Management; Camera Calibration.

1. Introducción

Los sistemas naturales proveen servicios y recursos como regulación del clima y protección de las poblaciones, espacios lúdicos, entre muchos otros, pero son sometidos a presiones antrópicas y naturales. De ahí la importancia de su conocimiento para una gestión adecuada. Uno de los principales problemas identificados para una adecuada gestión de los recursos naturales es la falta de información.

Tomando como antecedente las diversas iniciativas mundiales y regionales para suministrar dicha información con nuevos métodos, tales como la teledetección, el radar, el video, etc. (Lillesand et al., 1984; Holman and Stanley, 2007), se comenta brevemente el desarrollo de sistemas (basados en la imagen) de apoyo a la toma de datos ambientales en la investigación y gestión de los recursos naturales.

Después de diversas discusiones con expertos, búsqueda de información e investigaciones se ha concluido que un sistema basado en imágenes digitales para cuantificar parámetros ambientales debe contemplar los siguientes aspectos: (1) Problemáticas ambientales por resolver (2), escala de trabajo, (3) variables por medir, (4) sistemas de toma de datos, y (5) tratamiento de la información.

Cuando se hace referencia a las *problemáticas ambientales*, el panorama puede ser muy amplio, pero en este trabajo se hará énfasis en temas marinos y costeros, aunque el espectro de temas también incluye temas hidráulicos y fluviales, de laboratorio, de topografía, entre otros. En cuanto a la *escala de trabajo*, consideramos que el ámbito de este trabajo es la escala local, la cual puede variar desde los centímetros hasta los kilómetros, y a nivel temporal desde los segundos hasta los años. Se hace esta aclaración porque existen otros sistemas basados en imágenes que cubren otras escalas, tales como los basados en satélites, los sistemas para microscopía mineral, etc. Entre las *variables a medir* se pueden mencionar algunas que permiten obtener indicadores ambientales como: líneas de costa, perfiles de playa, batimetrías y topografías, oleaje, sistemas de corrientes en el mar, vertidos en el mar, número de usuarios en las playas, número de barcos en los puertos, daños en las estructuras costeras, áreas de vegetación y salud de las mismas, en el caso de los temas marítimos y costeros.

Los *sistemas de toma de datos* pueden ser muy diversos y varían mucho en costos, según las especificaciones, tipo de tecnología,

niveles de precisión, etc. Sin embargo se pueden mencionar: el video digital, fotografía digital, radar, sensores de infrarrojos, entre otros. En el *tratamiento de la información* para obtener las variables que se desean medir se deben involucrar diversas disciplinas y tener en cuenta que, según la variable a medir será más útil una tecnología u otra. Este trabajo se concentra en el tratamiento 2D de las imágenes, aclarando que este enfoque puede combinarse con diversas tecnologías de toma, almacenamiento y transmisión de datos, las cuales harán la solución más o menos costosa. Sin embargo, es en este enfoque donde más experiencia se tiene y es como tradicionalmente se ha abordado el problema, aprovechando su vigencia, su relación costo-beneficio y la utilidad que provee en las diversas escalas espacio-temporales que puede abarcar.

Se presenta en este trabajo un conjunto de técnicas para obtener datos cuantitativos de una forma fácil y económica a partir de medidas de corto y largo plazo, sobre imágenes instantáneas o modificadas mediante algún operador matemático o estadístico. Esta investigación aplica los sistemas basados en imágenes digitales en la obtención de parámetros ambientales, con el propósito de tener un equipo robusto, capaz de cuantificar en forma continua los cambios en diversas zonas naturales, de manera que ayude a los científicos a entender los procesos y a los gestores a tomar decisiones.

2. Sistema de Video

Una de las características más importantes al realizar mediciones de fenómenos naturales es la manera en que la escala espacio-temporal de sensado afecta los datos obtenidos y limita los procesos que puede representar. Para tratar de afrontar este problema de recolección de información, en la Universidad de Oregon (Estados Unidos) se comenzó a experimentar con imágenes obtenidas a partir de cámaras de video con la intención de capturar series de *runup*¹ en una porción de playa (Holman y Bowen, 1984). Visualizando las ventajas de este nuevo enfoque, comenzó el desarrollo de sistemas fijos de medición, los cuales consisten, en general, de una estación de cámaras digitales, un computador local que almacena la información y a su vez la

¹ *Sobreelevación del nivel del mar en cercanías a la costa por causa del oleaje.*

transmite (generalmente vía Internet) a otro computador de respaldo y procesamiento como se muestra en la Figura 1. Posteriormente se han desarrollado distintos conjuntos de aplicaciones ensambladas a interfaces gráficas para el manejo en base de datos de la información recopilada y su procesamiento como el propuesto en Holman *et al.*, (1993).

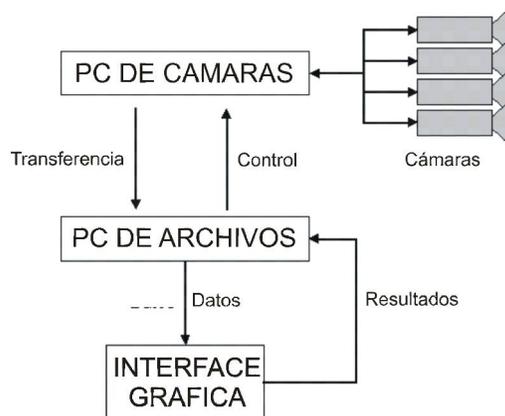


Figura 1. Esquema general de estaciones de monitoreo a través de cámaras de video.

El sistema ARGUS ha sido pionero en este tipo de sistemas (Holman y Stanley, 2007). Sin embargo, el desarrollo tecnológico en la capacidad de procesamiento y en la resolución de captura de imágenes y videos digitales ha permitido un avance importante en el alcance de las aplicaciones desarrolladas para el monitoreo ambiental en general, como son los casos del proyecto INDIA (Morris *et al.*, 2001), el proyecto HORS (Takewaka *et al.*, 2002) para el monitoreo costero a través de un globo aerostático y el proyecto CAM-ERA, entre otros. La fiabilidad, precisión y versatilidad de los sistemas de video costeros han sido rigurosamente descritos y revisados en la literatura científica (e.g. Aarninkhof *et al.*, 2000, 2005; Chickadel *et al.*, 2003; Stockdon and Holman, 2000; Holland and Holman, 1993; Holland *et al.*, 2001; Lippmann and Holman, 1991; Plant and Holman, 1997).

2.1. Ubicación de las cámaras

Según la necesidad, es importante definir la cantidad y ubicación de las cámaras de acuerdo con el tamaño de la región de interés

y con la resolución espacial deseada. La resolución espacial es un término usado en el procesamiento digital de imágenes para referirse al mínimo tamaño que debe tener un objeto para ser reconocido dentro de la imagen. Por ejemplo, una imagen del satélite Landsat 1 (en el espectro visible), tiene una resolución espacial de 79×79 (mxm). La resolución espacial depende de la distancia a la que se encuentra la cámara de la región de interés y la cantidad de píxeles que tiene su sensor. A mayor resolución espacial, es posible distinguir objetos mas pequeños en la imagen, (de la Escalera, 2001). En el caso de las plataformas para el monitoreo de variables ambientales basadas en imágenes y video, no es posible tomar imágenes que tengan una resolución espacial constante, porque para esto es necesario una ubicación perpendicular a la superficie, por lo que éstas son tomadas normalmente de forma *oblicua* a la región de interés. En la Figura 2 se muestra la resolución espacial en algunos puntos de una imagen correspondiente al sistema de medición montado y gestionado por la Universidad de Cantabria, el cual está ubicado en la playa La Magdalena, Santander, en el norte de España.

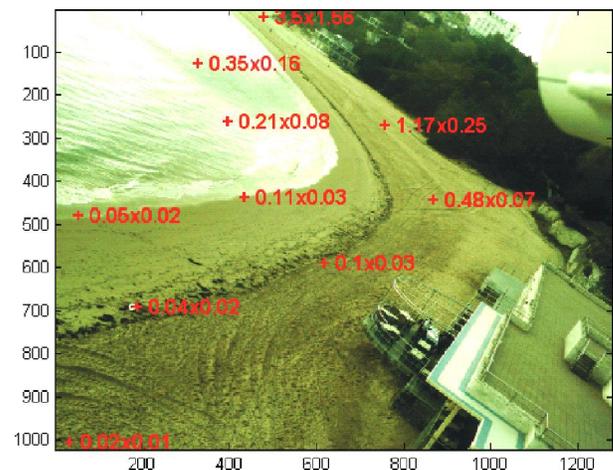


Figura 2. Resolución espacial (dist. horizontal X dist. vertical en metros) en varios puntos de una imagen de 1280×1022 píxeles, correspondiente al sistema en la playa La Magdalena.

Otro aspecto por tener en cuenta al definir la orientación final de las cámaras es que contenga un número suficiente de puntos de control en tierra (GCPs) de los cuales se conocen sus coordenadas en el espacio real (X,Y,Z) y que son fácilmente identificables en la imagen (coordenadas U,V). Éstos permiten establecer una relación matemática entre cualquier punto en el espacio y su proyección

en la imagen (ver sección 2.4.1). En ambientes diferentes al urbano, la definición de GCPs claros se convierte en una tarea complicada pues no existe infraestructura fija y fácilmente identificable como esquinas de edificios, ventanas, postes de luz, etc.

2.2. Toma de datos

Dependiendo de la necesidad se pueden tomar muchos tipos de datos, en el caso de sistemas de monitoreo costero los más comunes son:

- Fotos *instantáneas* tomadas a la región que cubre una o varias cámaras.
- Grupos de imágenes o de píxeles en las imágenes capturados en un tiempo de exposición, sobre los cuales se aplica algún tipo de *operador* estadístico o matemático, como el caso de un *promedio*, *varianza*, *mediana*, entre otros. Este tipo de procesamiento permite inferir otro tipo información al incluir la variable temporal. En el caso del oleaje se puede conocer las zonas de disipación de energía, formación de barras, canales, etc. (Holman y Stanley, 2007).

Sin embargo, las plataformas de monitoreo permiten definir formatos de imágenes y/o video calculados a la medida desde el sistema de captura o de procesamiento.

La resolución temporal se refiere al tiempo que transcurre entre dos observaciones consecutivas realizadas por la cámara. Dependiendo de la aplicación, es necesario tener una mayor o menor resolución temporal. En el caso de imágenes del tipo *instantáneas*, ésta es indicada por el intervalo de tiempo entre sensado, para imágenes resultado de aplicar algún operador matemático o estadístico la resolución estará dada por el mayor intervalo entre datos utilizados para su cálculo.

2.3. Calibración de cámaras

Sobre las imágenes se pueden hacer observaciones cualitativas de algunas variables, pero no es posible todavía hacer mediciones de distancias dentro de la imagen si no se cuenta con una resolución espacial constante. Dado que en los sistemas de monitoreo las imágenes son oblicuas, la estrategia más usada es obtener un modelo de la cámara que relacione las coordenadas de un punto visible en la imagen con las coordenadas de dicho punto en el mundo real. Normalmente estos modelos tienen en cuenta parámetros que están relacionados con el hardware de captura

de las imágenes: la distancia focal de los lentes, f , la distorsión debida a los lentes, el tamaño del sensor de la cámara, el factor de escala, s_p , que representa la relación entre el tamaño del píxel y el tamaño del sensor CCD, y la ubicación del punto principal de la imagen, (u_p, v_p) , que es el punto del plano de la imagen por el que pasa el eje focal. Estos parámetros son conocidos como parámetros intrínsecos de la cámara y normalmente se miden con pruebas de laboratorio o son dados por el fabricante.

Los otros parámetros usados en dichos modelos son los llamados extrínsecos, los cuales permiten obtener la descripción geométrica de la orientación y posición de la cámara respecto a un sistema de coordenadas en el campo. Normalmente corresponden a los ángulos de rotación y los valores de traslación del plano de la imagen con respecto al sistema de referencia. Un modelo usualmente empleado es el modelo *pinhole* para cámaras (Abdel Aziz y Karara, 1971; de la Escalera, 2001; Heikkilä y Silvén, 1997; Holland et al; 1997), basado en el principio de colinealidad, el cual asume que cada punto en el espacio es proyectado en la imagen por una línea recta que pasa por el foco de la imagen. Si aceptamos que las coordenadas de la cámara en el sistema de referencia, (x_c, y_c, z_c) , coinciden con las coordenadas del foco de la imagen y tomamos el punto (x, y, z) en el espacio, su correspondiente proyección en la imagen se encuentra en el punto de coordenadas (u, v) tal y como se presenta en la Figura 3.

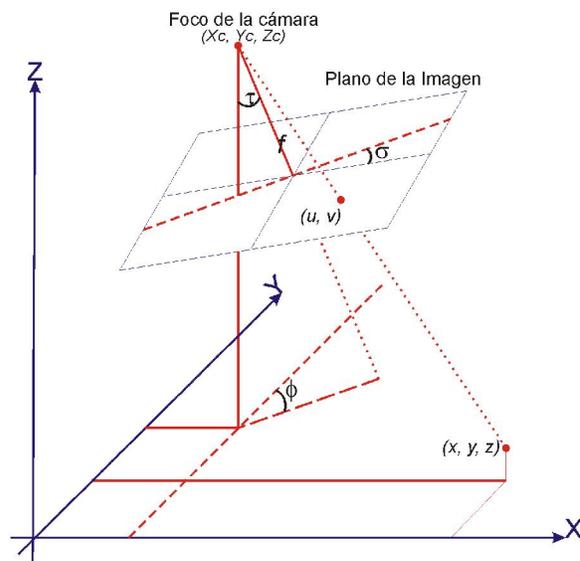


Figura 3. Diagrama correspondiente a la proyección de la cámara bajo el principio de colinealidad. El parámetro f corresponde a la distancia focal de la imagen y los ángulos α , τ y ϕ representan la rotación del plano de la imagen respecto al sistema de referencia.

En este trabajo, como es usual en la literatura de procesamiento de imágenes, el origen del sistema coordenado en la imagen se encuentra en el extremo superior izquierdo de ésta. En el modelo *pinhole* primero se transforman las coordenadas de un punto en el espacio (x, y, z) a las coordenadas del plano de la imagen $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ por medio de una traslación y una rotación:

$$\begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\phi \cos\sigma + \sin\phi \cos\tau \sin\sigma \\ m_{22} &= -\sin\phi \cos\sigma + \cos\phi \cos\tau \sin\sigma \\ m_{33} &= \sin\tau \sin\sigma \\ m_{21} &= -\cos\phi \sin\sigma + \sin\phi \cos\tau \cos\sigma \\ m_{21} &= \sin\phi \sin\sigma + \cos\phi \cos\tau \cos\sigma \\ m_{23} &= \sin\tau \cos\sigma \\ m_{31} &= \sin\phi \sin\tau \\ m_{32} &= \cos\phi \sin\tau \\ m_{33} &= -\cos\tau \end{aligned}$$

Los valores m_{11}, \dots, m_{33} son cósenos directores por lo cual su valor numérico no varía si se usa otro sistema de rotación, por ejemplo el definido por los ángulos medidos sobre los ejes del sistema coordenado de la imagen (k, w, j) (Wolf, 2000). La proyección del punto $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$ en el plano de la imagen se expresa como:

$$\begin{bmatrix} \tilde{u} \\ \tilde{v} \end{bmatrix} = \frac{f}{z} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Las unidades en la imagen están en píxeles, de modo que se necesita usar un coeficiente horizontal, D_u , y otro vertical, D_v , para transformar las unidades de metros a píxeles. El valor de estos coeficientes se puede estimar de los parámetros entregados por el fabricante de la cámara, aunque no es problema si no se conoce su valor exacto pues son linealmente dependientes de la distancia focal, f , y el factor de escala, s_v . Usando estos parámetros, las coordenadas de imagen en píxeles correspondientes al punto (u, v) están dadas por:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_u s_u \tilde{u} \\ D_v \tilde{v} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Como cualquier modelo, el modelo *pinhole* es una representación simplificada del sistema real (en este caso la proyección de la cámara). Por sí solo no es suficiente si se requiere una alta precisión y generalmente se usa como una base que es ampliada con algunas correcciones para las coordenadas en la imagen, orientadas a contrarrestar las distorsiones sistemáticas causadas por los lentes.

Los lentes presentan dos tipos de distorsión principalmente: la radial, que causa un desplazamiento del punto real en el plano de la imagen en dicha dirección, y la distorsión tangencial que ocurre cuando los centros de curvatura de la superficie del lente no son colineales. Una expresión que permite representar el factor de corrección debido a la distorsión radial y tangencial es:

$$\begin{bmatrix} \delta u \\ \delta v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2p_1 \tilde{u} \tilde{v} + p_2 (r^2 + 2\tilde{u}^2) + \tilde{u} (k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots) \\ p_1 (r^2 + 2\tilde{v}^2) + 2p_2 \tilde{u} \tilde{v} + \tilde{v} (k_1 r + k_2 r^2 + k_3 r^3 + \dots) \end{bmatrix} \quad (4)$$

donde p_1 y p_2 son coeficientes para la distorsión tangencial, mientras que k_1, k_2, k_3 , son coeficientes para la distorsión radial y $r = \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2}$. Usualmente son suficientes 2 o 3 parámetros para la distorsión radial, mientras que la distorsión tangencial puede ser despreciada. Para obtener estos parámetros en laboratorio, se usan arreglos donde aparecen puntos equidistantes y con ubicación conocida, de modo que se puede calcular la proyección ideal de ellos en la imagen y calcular así la corrección necesaria. Teniendo en cuenta estos factores de corrección y el modelo *pinhole*, el modelo de proyección de la cámara se puede expresar como:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_u s_u (\tilde{u} + \delta u) \\ D_v (\tilde{v} + \delta v) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Es necesario aclarar que durante el experimento de laboratorio para obtener los parámetros de distorsión es necesario usar la configuración definitiva con la que se instalará la cámara en el sitio. En la Figura 4 se presentan dos ejemplos de objetos de calibración.

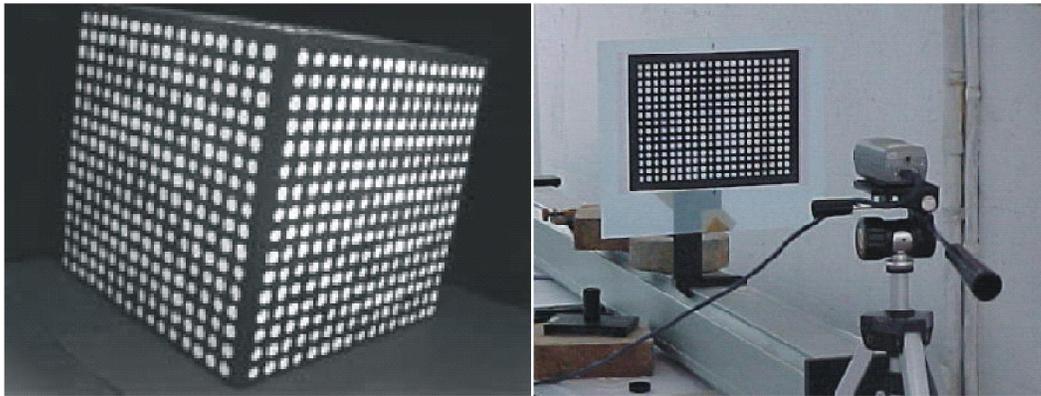


Figura 4. Objeto de calibración tridimensional (izquierda) tomado de Heikkilä y Silvén, (1997) y montaje con carta de calibración (derecha).

2.4. Procesamiento

Las tareas de procesamiento se refieren a procesos que se realizan antes de poder realizar alguna medición en las imágenes. Entre estas tareas se cuenta la clasificación de las imágenes, el filtrado de regiones específicas, y la solución del modelo de calibración de la cámara, como por ejemplo el modelo *pinhole* (3). En esta sección se presenta la transformada lineal directa, (DLT) por sus siglas en inglés (Direct Linear Transform), la cual constituye un modelo de calibración simplificado que no tiene en cuenta la distorsión introducida por los lentes y que ha sido usado por diferentes autores (Abdel Aziz y Karara, 1971; Heikkilä y Silvén, 1997) y se ha presentado en diversos libros como Hartley y Zisserman (2003) y Wolf (2000).

2.4.1. Transformada Lineal Directa y métodos de solución

El modelo *pinhole*, presentado en la ecuación (3), es un modelo no lineal, lo cual dificulta el cálculo de los parámetros aún si se cuenta con suficientes GCP para calcularlos. En principio (3) tiene 12 parámetros desconocidos, lo que implica que se necesitan al menos 6 GCP para resolver el sistema. En Holland *et al.*, (1997), se presenta una estrategia para resolver de forma iterativa el modelo *pinhole* y bajo ciertas suposiciones y cálculos previos de algunos parámetros, reducen a 4 el número de GCP necesarios. Por otro lado, en Wolf, (2000) se hacen algunas simplificaciones en la DLT para reducir el número de parámetros desconocidos a 8, asumiendo que los puntos son proyectados en la imagen desde otro plano no paralelo.

Una estrategia usada por algunos autores (Heikkilä y Silvén, 1997) es calcular la DLT, la cual puede obtenerse a partir del modelo

pinhole (Abdel Aziz y Karara, 1971) hallando expresiones para las coordenadas (u, v) de cada GCP y se expresa por:

$$\begin{bmatrix} u_i w_i \\ v_i w_i \\ w_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

donde (u, v) representa las coordenadas del punto en la imagen correspondientes al punto i ubicado en el espacio con coordenadas (x, y, z) . Los parámetros $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{34}$ se obtienen a partir de los parámetros del modelo *pinhole* (Holland *et al.*; 1997) y carecen de interpretación física. La DLT representa una excelente herramienta en aplicaciones que no necesitan alta precisión, pero también puede usarse como base para un modelo más amplio que incluya correcciones por la distorsión debida a los lentes. Calculados los parámetros de la DLT en (6), se puede tomar un punto en el espacio y calcular su proyección en la imagen directamente con (6), mientras que para calcular la posición de un punto en el espacio dado que se conozca su ubicación en la imagen se necesita conocer además, una de las tres coordenadas reales de ese punto x, y o z . En aplicaciones donde la región de interés es casi plana, se acostumbra usar un valor de z constante para hacer cálculos de coordenadas (x, y, z) dados (u, v) .

Supongamos que para una imagen tomada, se cuenta con suficientes GCP (se conocen puntos de la imagen y sus correspondientes coordenadas en el espacio), entonces para calcular los parámetros en (6) se elimina w_i . Para esto, se definen:

$$L = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 u_1 & -y_1 u_1 & -z_1 u_1 & -u_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & -x_1 v_1 & -y_1 v_1 & -z_1 v_1 & -v_1 \\ \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_i u_i & -y_i u_i & -z_i u_i & -u_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_i & y_i & z_i & 1 & -x_i v_i & -y_i v_i & -z_i v_i & -v_i \\ \vdots & \vdots \\ x_N & y_N & z_N & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_N u_N & -y_N u_N & -z_N u_N & -u_N \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_N & y_N & z_N & 1 & -x_N v_N & -y_N v_N & -z_N v_N & -v_N \end{bmatrix}_{2N \times 12}$$

y

$$a = [a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{14} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{24} \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33} \ a_{34}]^T$$

donde N representa el número de GCP usados. Usando estas dos definiciones, se puede expresar (6) como:

$$La = 0 \quad (7)$$

Para evitar soluciones triviales de (7), se recurre a usar normalizaciones o restricciones. La normalización más común es hacer $a_{34} = 1$ lo que permite además, resolver el sistema resultante en términos de pseudoinversas. El problema de esta normalización es que introduce una singularidad si el valor real de a_{34} es cercano a 0 (Heikkilä y Silvén, 1997). Faugeras y Toscani, (1987) proponen realizar la normalización $a_{31}^2 + a_{32}^2 + a_{33}^2 = 1$ que no presenta singularidades.

Hartley y Zizzerman (2003) proponen un método de solución que usa el vector singular correspondiente al valor singular más pequeño de L como punto de partida para resolver el problema de minimización no lineal dado por:

$$\min_a \left\{ \sum_{i=1}^N \left[\left(\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} - P(x_i, y_i, z_i/a) \right)^T \left(\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} - P(x_i, y_i, z_i/a) \right) \right] \right\} \quad (8)$$

donde $P(x_i, y_i, z_i/a)$ corresponde a la proyección del punto (x_i, y_i, z_i) hecha por la DLT usando el vector de parámetros a . Este método presenta un inconveniente dado que no siempre se puede

mostrar la continuidad del funcional en (8) ni la compacidad del subconjunto de R^{12} donde se realiza la minimización, las cuales son condiciones necesarias para garantizar matemáticamente la existencia del mínimo. Para profundizar en los conceptos sobre continuidad, compacidad y existencia de máximos y mínimos ver Rudin, (1976) o algún otro libro de análisis real.

2.4.2. Selección y filtrado de imágenes

Siempre que se usen imágenes para monitoreo ambiental es necesario definir algunas propiedades que deben cumplir para que las mediciones (sean cualitativas o cuantitativas) puedan realizarse en forma correcta y confiable. Por ejemplo, una imagen con poca luminosidad no es apropiada para identificar objetos y/o bordes, por lo cual podría pensarse en rechazarla al hacer mediciones. Conceptos comunes en procesamiento de imágenes como el histograma de una imagen, la ubicación de su centro de masa, entre otros, pueden usarse para determinar si una imagen tiene poca luminosidad o si al contrario está altamente saturada, (para profundizar en conceptos de procesamiento digital de imágenes, ver De la Escalera, 2001; Pratt, 2001). En la Figura 5 se presentan ejemplos de histogramas correspondientes a imágenes oscuras, saturadas e imágenes bien iluminadas.

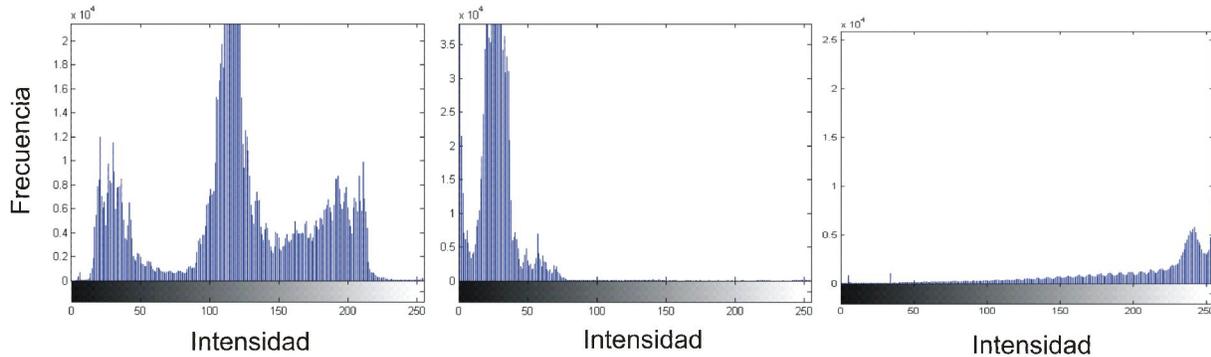


Figura 5. Histograma correspondiente a una imagen oscura (izquierda), una imagen bien iluminada (centro) y una imagen saturada (derecha).

En otros casos es necesario filtrar la imagen para eliminar ruidos sistemáticos debidos a los dispositivos de captura, o remover los cambios de altas (o bajas) frecuencias en la intensidad de la imagen. Aquí se pueden utilizar diferentes tipos de filtros (gaussiano, de paso bajo, de disco, entre otros), los cuales permiten disminuir las variaciones en algún tipo de frecuencia en la imagen con el fin de interpretarla mejor (Pratt, 2001).

2.5. Post procesamiento

A esta etapa se refiere toda manipulación sobre la imagen que permita extraer datos cuantitativos sin alterar la base de datos con la información capturada originalmente. Se destacan la rectificación de imágenes, la fusión, la detección de bordes y la detección de objetos.

2.5.1. Rectificación de las imágenes

Si ya se tiene resuelto alguno de los modelos para la cámara, es posible construir imágenes que se asemejan a ortofotos de la región de interés, a partir de los datos originales. Este proceso es conocido como rectificación.

Definida la región de interés sobre la imagen, las coordenadas (u, v) de todos los puntos en ésta son extraídas directamente, teniendo en cuenta que se debe asignar una de las tres coordenadas en el espacio (x, y, z) para calcular las otras dos coordenadas (generalmente, se asigna un valor constante a la misma coordenada para cada punto). Si en (6) se asume $z_i = z_0$ para todos los puntos en la imagen, se puede escribir la expresión para las coordenadas (x, y) correspondientes como:

$$\begin{bmatrix} x_j \\ y_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} - a_{31}u_j & a_{12} - a_{32}u_j \\ a_{21} - a_{31}v_j & a_{22} - a_{32}v_j \end{bmatrix}^+ \begin{bmatrix} (z_0 a_{33} + a_{34})u_j - a_{13} - a_{14} \\ (z_0 a_{33} + a_{34})v_j - a_{23} - a_{24} \end{bmatrix} \quad (9)$$

donde $[]^+$ representa la pseudoinversa de una matriz .

Las imágenes obtenidas con la rectificación basada en (9) sólo presentan distorsiones debidas a los cambios de elevación de la región rectificada.

El proceso de rectificación se puede llevar a cabo de dos formas:

- **Rectificación directa:** En este caso se toma una malla sobre la región en la imagen oblicua (original) y se calculan las coordenadas en la imagen rectificada de cada punto en la malla para luego copiar el valor de intensidad en ese punto. Aquí debe recordarse que cada píxel de una imagen tiene un valor de intensidad si la imagen está en escala de grises o tiene 3 valores de intensidad si es una imagen a color (ver libros de procesamiento digital de imágenes como De la Escalera, 2001 o Pratt, 2001). Este tipo de rectificación tiene el inconveniente de que pueden aparecer huecos en la imagen rectificada y no se tiene control sobre el tamaño final de la imagen rectificada.
- **Rectificación inversa:** Para rectificar inversamente se define el tamaño final de la imagen rectificada y la región en coordenadas (x, y, z) que abarcará. También es posible definir la región de interés y la resolución final (en m/píxel) deseada. Luego se calcula la malla sobre la región abarcada por la imagen rectificada, de modo que se garantiza que no existirán huecos, y luego se calcula cual es el punto correspondiente en la imagen oblicua a cada punto en la malla y se copia el valor de intensidad de dicho punto. Es posible que el cálculo del

punto correspondiente en la imagen oblicua, no corresponda exactamente a un punto de la imagen, lo que obliga a interpolar los valores de intensidad para obtener una imagen rectificada con valores suavizados. Su desventaja es que representa un mayor costo computacional respecto a la rectificación directa.

En la Figura 6 se presentan una imagen de la cámara 2 del sitio La Magdalena con una región seleccionada para ser rectificada y el resultado de rectificar inversamente dicha región asumiendo $z=0$ y definiendo resolución de salida de 0.5 m/píxel.

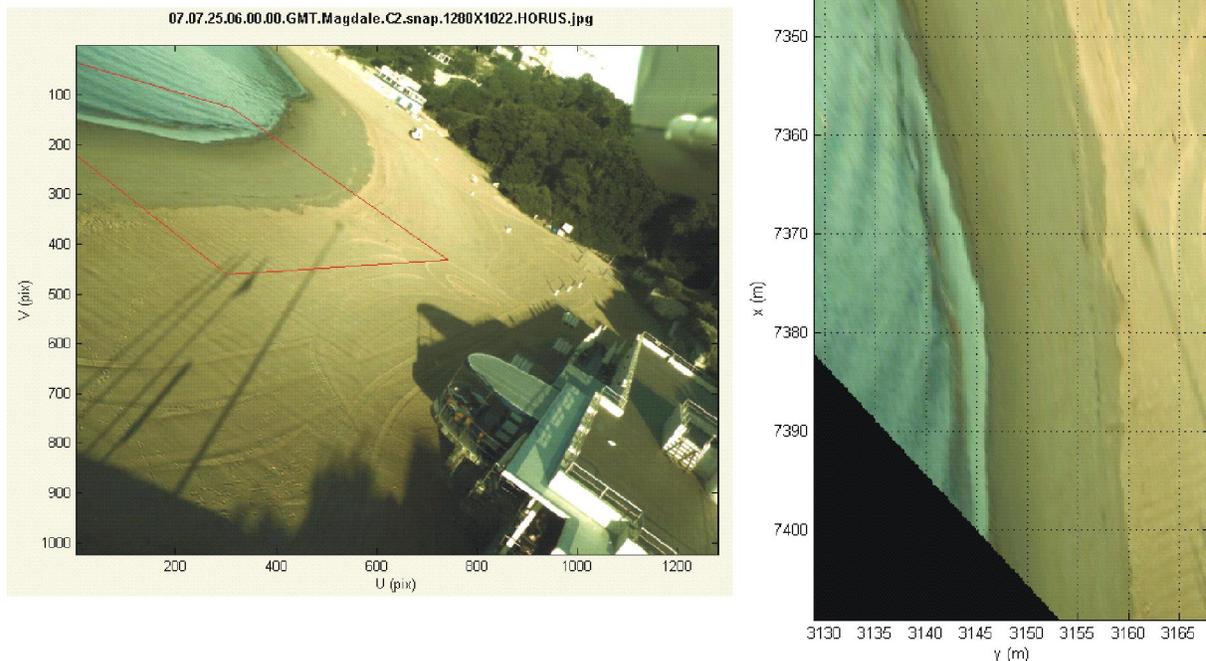


Figura 6. Región seleccionada en un recuadro rojo para rectificación (izquierda) e imagen rectificada de dicha región (derecha).

2.5.2. Fusión de imágenes

Ya se mencionó anteriormente que es posible que la región de interés no pueda abarcarse con una sola cámara, razón por la cual se ubican varias cámaras cubriendo distintas porciones de la región de interés, cuidando que entre las imágenes de dos cámaras consecutivas una parte de la región de interés se solape. Esto permitiría fusionar las imágenes originales para obtener una vista panorámica de la región de interés. Si además, ya se ha calibrado el conjunto de cámaras y alguno de los modelos presentados anteriormente está resuelto para cada cámara, es posible obtener una imagen rectificada y fusionada de la región de interés.

2.5.3. Detección de bordes

En algunas aplicaciones de monitoreo ambiental, es necesario determinar los bordes que delimitan una región para luego poder realizar mediciones con base en los límites obtenidos. La detección

de bordes se basa en la búsqueda de cambios o discontinuidades en la amplitud de un atributo de la imagen, como la luminosidad, pues estos cambios o discontinuidades generalmente permiten identificar la extensión física de los objetos en la imagen (Pratt, 2001). También es posible hacer detección de bordes usando características como la textura de las regiones (De la Escalera, 2001; Pratt, 2001).

Una de las estrategias más comunes es interpretar la intensidad (o luminosidad, según sea el caso) de la imagen como una función $f: R^2 \rightarrow R$, por lo cual se puede usar un operador gradiente o similar para determinar los bordes buscando los valores extremos, mínimos o máximos locales del gradiente mencionado.

En el caso del monitoreo ambiental, la detección de bordes es utilizada para determinar la frontera de dos regiones, por ejemplo la interfaz tierra-agua en el caso de ríos, costas, etc. En la Figura 7 se presenta una imagen del sitio La Magdalena y su correspondiente

imagen con bordes obtenidos usando el filtro de *Canny* y un umbral de 1.5. Para profundizar en la detección de bordes y los distintos métodos, ver libros sobre Procesamiento de imágenes como De la Escalera (2001), o Pratt (2001); también se puede consultar

Canny (1986), para estudiar a fondo el método usado en el ejemplo. En la Figura 7 puede apreciarse que existe un borde bien definido entre el agua y la arena en la playa.



Figura 7. Imagen tomada de La Magdalena (izquierda) y los respectivos bordes hallados con el método de *Canny* (derecha).

2.5.4. Detección de objetos

Otra posible aplicación de técnicas de procesamiento de imágenes para el monitoreo ambiental es la detección de objetos. En este caso se desea identificar, contar y/o ubicar en el espacio algún objeto en particular, ya sea flora, fauna, personas, barcos, número de piezas de una estructura o elementos que circulan por la región de interés.

La detección de objetos consiste en dos pasos:

- **Umbralización:** Es el proceso por el cual se separan todos los posibles objetos del fondo de la imagen. Las técnicas de umbralización se basan en que los objetos tienen una superficie parecida y el fondo es uniforme (De la Escalera, 2001). Para umbralizar pueden usarse características estadísticas de la imagen, conocimiento del tamaño de los objetos, características de color o detección de bordes conectados (Pratt, 2001). Generalmente, la umbralización entrega una imagen binaria (en blanco y negro) donde un píxel en nivel alto pertenece a un objeto mientras un píxel en nivel bajo pertenece al fondo.
- **Etiquetado:** La umbralización separa los objetos del fondo, pero no permite distinguirlos entre sí debido a que todos

tienen un mismo valor de intensidad. El etiquetado se basa en conceptos de vecindad de píxeles y permite determinar cada uno de los píxeles correspondientes a un objeto pues hace un recorrido por toda la imagen de modo que al primer píxel en nivel alto le asigna la etiqueta 1 y examina sus píxeles vecinos para ver si tienen también un nivel alto. Cuando se encuentra un píxel en nivel alto que no es vecino de los píxeles con etiqueta 1, se le asocia la etiqueta 2 y así sucesivamente (Pratt, 2001).

Otra técnica de detección de objetos que realiza implícitamente la umbralización dado que elige píxeles semilla y busca los vecinos que tengan características similares a ellos, se llama *crecimiento de regiones* (Stuart et al, 2002).

En el caso de los sistemas para monitoreo costero, puede desearse identificar embarcaciones en el caso de puertos, o usuarios en el caso de playas con funciones recreativas y turísticas. En la Figura 8 se presenta una imagen de La Magdalena y sus usuarios en una región de interés usando umbralización y etiquetado. Aunque en este ejemplo se identificaron los objetos en toda la imagen (403 en total), también es posible definir la región de interés con el fin de trabajar sobre regiones de características con un alto grado de uniformidad.

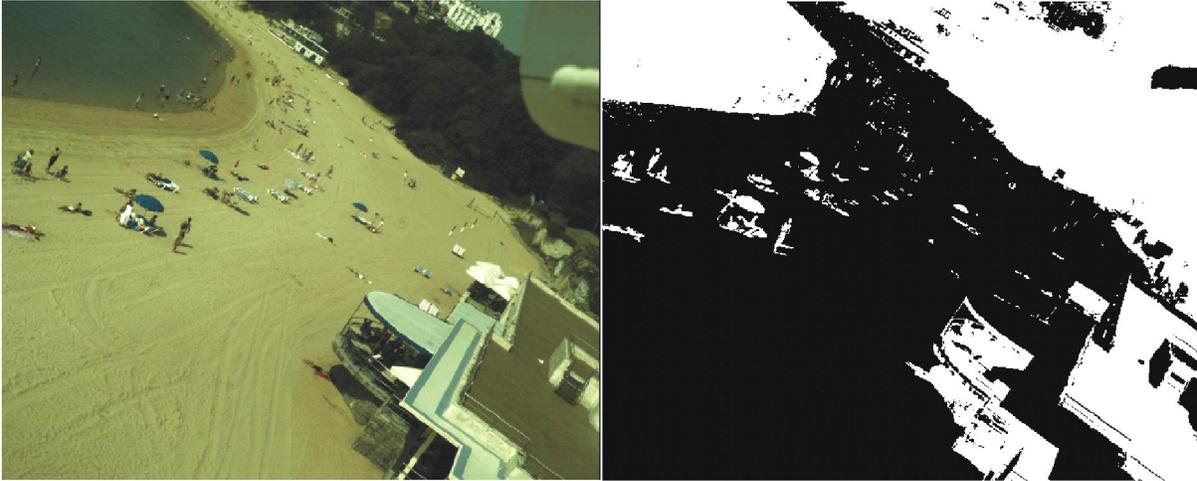


Figura 8. Imagen de La Magdalena y objetos detectados en blanco.

3. Aplicaciones en Zonas Costeras

Las aplicaciones de los sistemas de monitorización basados en imágenes digitales son muy diversas, así que siguiendo las ideas expuestas en la sección anterior se presentan algunas referencias bibliográficas de aplicaciones en zonas costeras y se nombran algunas nuevas posibilidades que se abren a partir de las técnicas de tratamiento digital de imágenes. Se pueden discriminar las aplicaciones más comunes según el tipo de procesamiento que se le realice a las imágenes o videos:

3.1. Detección de bordes

El reconocimiento automático de contornos permite realizar seguimiento de interfaces reconocibles. En el caso de la detección de la línea de costa o de las márgenes de los ríos en varios intervalos de tiempo, se pueden cuantificar procesos erosivos o de acreción (Turner et al., 2001). También se puede hacer un seguimiento a la estabilidad de obras de defensa litoral (Holman y Guza, 1984), entre otras aplicaciones.

Diversos autores han trabajado en la línea de desarrollar modelos robustos para detectar líneas de costa (Plant et al, 2007; Osorio, 2005). Sin embargo, los modelos matemáticos actuales que resuelven la relación entre el espacio de la imagen y el espacio real no pueden determinar una de las tres coordenadas del espacio real (x, y, z) por eso algunos autores han resuelto el problema de la estimación de la elevación de la línea de costa a partir de dos

ideas: utilizando las condiciones hidrodinámicas en el momento de captura de la imagen (Aarninkhof et al, 2000) y usando técnicas estereográficas (Holland and Holman, 1997).

Dentro del estudio morfodinámico de la costa, la aplicación de estas técnicas para la detección sistemática de elementos morfológicos como la línea de costa, la localización de barras, canaletas de corrientes, morfología de zonas dunares, y en general la topo-batimetría de la playa a una alta frecuencia por periodos largos de tiempo, han permitido entender como ha sido la evolución de estos sistemas, y proporcionar información para predecir su comportamiento.

3.2. Detección de objetos

La detección de objetos presenta un panorama igualmente amplio al de los bordes. Publicaciones como la de Jiménez *et al* (2007) y Osorio *et al* (2007) muestran aplicaciones importantes para la gestión de costa como uso turístico, donde se usa el conteo y seguimiento espacio-temporal de usuarios de playa con miras a optimizar la infraestructura disponible y determinar índices de saturación de espacio.

Otra aplicación importante de la detección de objetos es el reconocimiento automático de GCPs, el cual permite realizar seguimiento a las posibles modificaciones de sus coordenadas (u, v), y de esta forma recalculan las geometrías (coeficientes del modelo DLT) asociadas con las cámaras instaladas.

3.3. Movimiento

Entre otras aplicaciones que han sido desarrolladas, cabe destacar aquellas relacionadas con parámetros hidrodinámicos: la obtención de datos de corrientes por medio del vídeo (Chickadel et al., 2003, Holland and Holman, 1997), medición de parámetros del oleaje (Aarninkhof et al., 2001; Lippman and Holman, 1991; Stockdon y Holman, 2000) y mediciones del ascenso/descenso por taludes de playas swash (Holland and Holman, 1993a; Holland et al. 2001).

Muchas de estas aplicaciones para seguimiento de movimiento requieren una protocolo diferente de toma de datos; la técnica más conocida es la denominada TimeStack, la cual es explicada por Morris et al. (2001) y Holman y Stanley (2007).

3.4. Indicadores

Con el fin de establecer un puente entre los científicos y los gestores, todos los resultados técnicos pueden y deben ser llevados a indicadores sencillos que reflejen de manera útil la información necesaria para tomar decisiones respecto a las diferentes problemáticas ambientales (Davidson et al, 2007).

Uno de los objetivos del proyecto Coastview (Davidson et al, 2007) era investigar y demostrar diferentes vías en las cuales los sistemas de vídeo podrían dar apoyo a procesos de manejo costero en costas sedimentarias. Dentro del ámbito de éste proyecto se han llevado a cabo aportes relacionados con distintos aspectos de la gestión costera como: la protección de la costa (Kroon et al, 2005), recreación y seguridad en el baño en playas (Jiménez, et al. 2007; Osorio et al, 2007), seguridad en la navegación y planes de dragado (Medina et al, 2007), avances en la tecnología de cámaras digitales que permiten mejores estrategias de toma de datos y altas resoluciones (Holman et al. 2007). Finalmente, la alta resolución espacio-temporal en la toma de datos, por periodos de tiempo muy grandes combinadas con una gran cobertura, abren nuevas posibilidades en cuanto a la predicción de la evolución costera. Smit et al. (2007) investigaron el uso de las imágenes de vídeo como condiciones de contorno para modelos basados en procesos, aproximaciones de modelado inverso combinando videomodelos y predicciones morfodinámicas con base en series de datos obtenidas de los vídeos.

4. Discusión y Conclusiones

Las bondades que nos ofrecen estos nuevos sistemas basados en imágenes digitales y las técnicas implementadas y explicadas en detalle en este artículo para el pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento de imágenes digitales, abren la puerta a una nueva forma de obtener información cuantitativa. La gran ventaja que se obtiene con estos sistemas es la economía, la versatilidad y la alta resolución temporal y espacial que ofrecen. Dicha información, tratada con rigor y complementando los sistemas tradicionales permite entender los procesos involucrados en las diversas problemáticas ambientales y ayuda a los técnicos y gestores a tomar decisiones.

La instalación del sistema basado en imágenes digitales en la playa de La Magdalena, Santander (España), ha permitido explicar, paso a paso, los diferentes elementos involucradas en la implementación de estas nuevas técnicas para medir variables ambientales. Aspectos tan importantes como la disposición de las cámaras (resolución espacial y temporal), calibración y posibilidades en la toma de datos han sido presentados, definiendo sus múltiples posibilidades, pero también aclarando sus limitaciones. Además, se muestra como transformar la información cualitativa (espacio bidimensional en la imagen) a información cuantitativa (espacio real), las ecuaciones involucradas, las variables a resolver y los métodos posibles. Se explica en la etapa de post-procesamiento lo referente al tratamiento digital de imágenes, donde la posibilidad de generar un imagen ortogonal de una zona en estudio, en la cual se pueden observar y cuantificar variables se ve claramente cuando se ilustra la rectificación y la fusión. Finalmente, la breve introducción que se hace al mundo de la detección de bordes y objetos muestra como todo lo que observamos en una imagen (variables ambientales en un espacio natural) se puede detectar de manera fiable y precisa con novedosas técnicas.

Dada la experiencia de los autores en temas marino-costeros, se muestran las principales aplicaciones encontradas en la literatura relacionadas con problemáticas ambientales en este ámbito; además se proponen nuevas ideas, algunas por abordar, otras en desarrollos y unas ya desarrolladas, donde la implementación y aplicación de estas tecnologías en problemas reales costeros muestra el potencial que tienen dichos sistemas para resolver otro tipo de problemáticas ambientales.

Finalmente, la experiencia adquirida en el proyecto Europeo Coastview y el enfoque metodológico para establecer un puente entre los científicos, las problemáticas, las variables medidas y los gestores, ha permitido plantear la importancia de utilizar indicadores medibles de las variables físicas involucradas en conflictos ambientales (caso mares y costas). Dichos indicadores obtenidos por medio de las técnicas de vídeo (con resolución temporal fina y continua) muestran claramente la importancia de registrar variaciones bajo diferentes escalas de tiempo (días a años) y espacio (metros a kilómetros), solamente observables desde una perspectiva novedosa, como la planteada en este artículo.

Referencias

- Aarninkhof, S.G.J., Caljouw, M. y Stive, M.J.F. 2000. Video-Based, quantitative assessment of intertidal beach variability, In: Proc. 27th International Conference of Coastal Engineering, Vol. IV, pp. 3291-3304.
- Aarninkhof, S.G.J. y Ruessink, B.G. 2001. Video observations of wave breaking and the implications for wave decay modelling, In: Proc. Coastal Dynamics 01. New York ASCE, pp. 979-988.
- Aarninkhof, S.G.J., Ruessink, B.G. y Roelvink, J.A. 2005. Nearshore subtidal bathymetry from time exposure images, Journal of Geophysical Research, Vol. 110, C06011, doi: 10.1029/2004JC002791.
- Abdel Aziz, Y.I. y Karara, H.M. 1971. Direct linear transformation from comparator coordinates into object spaces coordinates in close range photogrammetry, Proc. ASP/UI Symp, Close Range Photogrammetry, Urbana, IL.
- Canny, J. 1986. A computational Approach to edge detection, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 8, No. 8, pp. 679-698.
- Chickadel, C.C., Holman, R.A. y Freilich, M.F. 2003. An optical technique for the measurement of longshore currents, Journal of Geophysical Research, 108 (C11), 3364 P.
- Davidson, M.A., Van Koningsveld, M., De Kruif, A., Rawson, J., Holman, R.A., Lamberti, A., Medina, R., Kroon, A. y Aarninkhof, S.G.J. 2007. The CoastView project: developing video-derived coastal state indicators in support of coastal zone management. Coastal Engineering Special Issue of the CoastView project. Vol 54 (6-7), pp. 463-475.
- De la Escalera, A. 2001. Visión por Computador. Fundamentos y métodos. Pearson Education, S.A., Madrid, 274 P.
- Faugeras, O. D. y Toscani, G. 1987. Camera calibration for 3D computer vision. Proc. Internacional Workshop on Industrial Applications of Machina Vision and Machina Intelligence, Silben, Japan, pp. 240-247.
- Hartley, R. y Zizzerman, A. 2003. Multiple View Geometry in Computer Vision, 2d Edition, Cambridge University Press, New York, NY, USA., 700 P.
- Heikkilä, J. y Silvén, O. 1997. A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction.
- Holland, K.T. y Holman, R.A. 1993. The statistical distribution of swash maxima on natural beaches, Journal of Geophysical Research, 98 (C6), pp. 10271-10278.
- Holland, K.T. y Holman, R.A. 1997. Video estimation of foreshore topography using trinocular stereo, Journal of Coastal Research, 13 (1).
- Holland, K.T., Holman, R.A. y Lippmann, T.C. 1997. Practical Use of Video Imagery in Nearshore Oceanographic Field Studies, IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol.22, No1, 81-92 P.
- Holland, K.T., Puleo, J.A., y Kooney, T.N. 2001. Quantification of swash flows using video-based particle image velocimetry, Coastal Engineering, 44, pp. 65-77.
- Holman, R.A. y Bowen, A.J. 1984. Longshore structure of infragravity wave motions, Journal of Geophysical Research, 89 (C4), pp. 6446-6452.
- Holman, R.A. y Guza, R.T. 1984. Measuring run-up on a natural beach, Coastal Engineering, 8, pp. 129-140.
- Holman, R.A., Sallenger Jr, A.H., Lippmann, T.C. y Haines, J.W. 1993. The application of video image processing to the study of nearshore processes. Oceanography, Vol. 6, No 3, pp. 78-85.
- Holman, R.A. y Stanley, J., 2007. The history, capabilities and future of Argus. Coastal Engineering Special Issue of the CoastView project. Vol 54 (6-7), pp. 477-491.

- Jiménez, J.A., Osorio, A., Marino-Tapia, I., Kroon, A., Medina, R., Davidson, M., Archetti, R., Ciavola, P. y Aarninkhof, S. 2007. Beach recreation planning using video derived coastal state indicators, Coastal Engineering Special Issue of the CoastView project. Vol 54 (6-7), pp. 507 - 521.
- Kroon, A., Aarninkhof, S.G.J., Armaroli, C., González, M, Medri, S., Osorio, A., Aagaard, T., Holman, R.A. y Spanhoff, R. 2007. Application of remote sensing video systems for coastline management problems, Coastal Engineering Special Issue of the CoastView project. Vol 54 (6-7), p. 493 - 505.
- Lippmann, T.C. y Holman, R.A. 1991. Phase speed and angle of breaking waves measured with video techniques, in Coastal Sediments, 91, edited by N. Kraus, ASCE, New York, pp. 542-556.
- Lillesand, T.M. y Kiefer, R.W. 1984. Remote Sensing and image interpretation, By Jhon Wiley y Sons, Inc.
- Medina, R., Marino-Tapia, I., Osorio, A., Davidson, M. y Martín, F.L. 2007. Management of dynamic navigational channels using video techniques, Coastal Engineering Special Issue of the CoastView project. Vol 54 (6-7), pp. 523 - 537.
- Morris, B.D., Davidson, M.A. y Huntley, D.A. 2001. Measurements of the response of a coastal inlet using video monitoring techniques, Marine Geology, 175, pp. 251 - 272.
- Osorio, A.F. 2005. Desarrollo de técnicas y metodologías basada en sistemas de vídeo para la gestión de la costa. Phd Thesis. Universidad de Cantabria.
- Osorio, A., Medina, R., Garcia, N. y Labégorre M. 2007. Utilisation de l'imagerie vidéo pour la gestion touristique du littoral: Exemple de la plage du « Puntal » (Santander, Espagne), Revue européenne de génie civil. (Aceptado para publicar)
- Plant, N.G. y Holman, R.A. 1997. Intertidal beach profile estimation using video images. Marine Geology 140 (1-2), pp. 1-24.
- Plant, N.G., Aarninkhof, S.G.J., Turner, I.L., y Kingston, K.S. 2007. The performance of shoreline detection models applied to video imagery. Journal of Coastal Research, 23(3), p. 658 - 670. West Palm Beach (Florida), ISSN 0749-0208.
- Pratt, W. 2001. Digital Image Processing: PIKS Inside, 3d Edition, John Wiley y Sons, Inc., USA.
- Rudin, W. 1976. Principles of mathematical analysis, 3d Edition, McGraw-Hill, USA.
- Smith, M.W.J., Aarninkhof, S.G., Wijnberg, K.M., González, M., Kingston, K.S., Southgate, H.N., Ruessink, B.G., Holman, R.A., Siegle, E., Davidson, M. y Medina, R. 2007. The role of video imagery in predicting daily to monthly coastal evolution, Coastal Engineering Special Issue of the CoastView project. Vol 54 (6-7), pp. 539 - 553.
- Stockdon, H.F. y Holman, R.A. 2000. Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery, Journal of Geophysical Research, 105 (C9), pp. 22, 015-22,033.
- Stuart, W., Perry, L. y Wong, H. 2002. Adaptive Image Processing, CRC Press, p288. Takewaka, S., Misaki, S. y Nakamura, T. (2003), Dye diffusion experiment in a longshore current field, Coastal Engineering Journal, Vol. 45, No. 3, pp. 471-487
- Takewaka, S., Misaki, S. y Nakamura, T. 2003. Dye diffusion experiment in a longshore current field, Coastal Engineering Journal, Vol. 45, No. 3, pp. 471-487
- Turner, I.L., Dronkers, T., Aarninkhof, S., y Mcgrath, J. 2001. The application of video imaging to quantify beach response to sand nourishment and construction of an artificial reef. 15th Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference, IEA, Gold Coast, pp. 55 - 60.
- Wolf, P. 2000. Elements of Photogrammetry with Applications in GIS, 3d Edition, McGraw-Hill, Boston, Massachusetts, 608 P.