

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Procesamiento Digital de Imágenes de Petroglifos  
Arqueológicos de La Cueva del Diablo y Los Santos sin  
Cabeza localizados en la Cordillera Costanera de Ecuador  
Propuesta tecnológica**

**Ana Michelle Avilés Hernández**

**Andrés Emilio Jerez Pilco**

**Ingeniería Electrónica**

Trabajo de titulación presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Electrónico

Quito, 1 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ  
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

HOJA DE CALIFICACIÓN  
DE TRABAJO DE TITULACIÓN

**Procesamiento Digital de Imágenes de petroglifos arqueológicos de La Cueva del Diablo y Los Santos sin Cabeza localizados en la Cordillera Costanera de Ecuador**

**Ana Michelle Avilés Hernández**  
**Andrés Emilio Jerez Pilco**

Calificación:

\_\_\_\_\_

Nombre del profesor, Título académico

Luis Miguel Prócel, Ph.D.

Firma del profesor

\_\_\_\_\_

Quito, 1 de mayo de 2019

## Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Ana Michelle Avilés Hernández

Código: 00125576

Cédula de Identidad: 1722076476

Firma del estudiante: \_\_\_\_\_

Nombres y apellidos: Andrés Emilio Jerez Pilco

Código: 00103868

Cédula de Identidad: 0604746370

Lugar y fecha: Quito, 1 de mayo de 2019

## RESUMEN

En el siguiente trabajo se desarrolló un método de procesamiento de imágenes aplicado a petroglifos en MATLAB con la finalidad de obtener como resultado imágenes binarizadas, conocidas como “vectorizadas” en el ámbito arqueológico. Las imágenes procesadas son de petroglifos que son superficies rocosas con figuras esculpidas los cuales tienen aproximadamente 1500 años de antigüedad y fueron localizados en dos zonas de la cordillera costanera de Manabí: La Cueva del Diablo y Los Santos Sin Cabeza. Se vio la necesidad de preservar y registrar la información existente mediante fotografías, debido a que poco a poco esta zona está siendo destruida por diversos factores relacionados a desastres naturales o a la acción humana. El proceso de vectorización inicia con la ecualización de la intensidad de las imágenes, para luego seguir con proceso de suavizado mediante técnicas de *denoising*, tales como Perona-Malik y curvatura, lo cual permite eliminar texturas indeseadas de la superficie de las rocas. Finalmente, se aplican diferentes técnicas de detección de bordes como filtro HV, filtro Laplaciano, filtro LOG y transformada Wavelet. Estos algoritmos usan un valor umbral que otorga al usuario control sobre los resultados de cada petroglifo. El método desarrollado en este proyecto puede presentarse como una contribución al campo arqueológico debido a que los resultados obtenidos fueron satisfactorios.

Palabras clave: Petroglifos, vectorización, suavizamiento, detección de bordes, binarización

## ABSTRACT

This work is about the development of a method to make digital image processing applied to petroglyphs in MATLAB. The expected result is to obtain binary images, which in archeology is called vectorization. The petroglyphs used for this project are 1500 years old images carved on rock surfaces in need of preservation due to factors such as natural disasters and human interaction. Field work consisted in taking pictures of the rocks from two places located in the Ecuadorian coast: La Cueva del Diablo and Los Santos sin Cabeza. The vectorization process started with image equalization, followed by the implementation of denoising techniques such as Perona-Malik and Curvature employed to eliminate unneeded texture found in the rock's surface. Afterward, multiple edge detection algorithms such as HV filter, Laplacian filter, LOG filter, and Wavelet transform were tested in order to find the best match for each petroglyph. All the algorithms developed included a threshold value for the user to be able to control image results. This project obtained satisfactory results, and presents itself as a tool that can be used to contribute in the field of archeology.

*Key words:* Petroglyphs, vectorization, denoising, edge detection, binarization

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Introducción .....</b>	<b>8</b>
<b>Desarrollo del Tema.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Procesamiento digital de imágenes de petroglifos.....</b>	<b>11</b>
Histograma.....	11
Ecuilización.....	11
Técnicas de <i>denoising</i> .....	13
Perona Malik.....	13
Curvatura .....	17
Detección de bordes.....	19
Método de filtros horizontales y verticales .....	19
Método del Laplaciano.....	20
Método del filtro LOG .....	21
Método de la transformada Wavelet.....	23
<b>2. Resultados.....</b>	<b>25</b>
La Cueva del Diablo.....	25
Los Santos sin Cabeza .....	27
<b>Conclusiones.....</b>	<b>29</b>
<b>Referencias bibliográficas.....</b>	<b>30</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Histogramas: a) Histograma de una imagen sin ecualizar, b) Histograma de una imagen ecualizada .....	12
Figura 2. De arriba hacia abajo: función paso y su primera, segunda y tercera derivada, respectivamente.....	15
Figura 3. Circunferencia oscilatoria en la curvatura .....	18
Figura 4. Comparación del petroglifo original con la detección de bordes por el método de filtros horizontales y verticales .....	20
Figura 5. Comparación del petroglifo original con la detección de bordes por el método Laplaciano.....	21
Figura 6. Respuesta del Laplaciano del Gaussiano .....	22
Figura 7. Comparación del petroglifo original con la detección de bordes por el método del filtro LOG .....	22
Figura 8. Diferencia entre a) tiempo muestreado b) FFT y c) FWT .....	23
Figura 9. Comparación entre petroglifo original y con el método de detección de bordes Wavelet .....	24
Figura 10. Resultado final del petroglifo 1.....	25
Figura 11. Resultado final del petroglifo 2.....	26
Figura 12. Resultado final del petroglifo 3.....	27
Figura 13. Resultado final del petroglifo 4.....	28

## INTRODUCCIÓN

Los petroglifos de acuerdo con Vásquez son imágenes esculpidas sobre una superficie rocosa, realizadas mediante la técnica de bajo o alto relieve; es decir, que fueron realizadas por el ser humano con instrumentos a través de abrasión o de incisión (2017). Además, de acuerdo con Martínez & Botiva (2014), los petroglifos al igual que las pictografías, están categorizadas como arte rupestre, por ende, fueron realizadas por el hombre primitivo a partir desde la última glaciación, aproximadamente hace 10,000 años a.C. Para Ecuador, esto correspondería desde los inicios del Periodo Arcaico (10,000 – 5,000 a.C.). Según Vásquez (2017), los petroglifos analizados en el laboratorio de arqueología del Centro de Investigaciones Socioculturales (CIS) de la USFQ provienen de dos sitios arqueológicos: La Cueva del Diablo y Los Santos sin Cabeza.

De acuerdo con Vásquez, los petroglifos del sitio arqueológico de La Cueva del Diablo provienen de un abrigo rocoso que está localizada en la subcuenca del Río Vendido, cantón Pichincha; mientras que los petroglifos de Los Santos sin Cabeza están localizados en el cantón Chone; ambos sitios están en la provincia de Manabí, en la cordillera costanera de Ecuador (2017). Temporalmente, de acuerdo con Vásquez (2017), los petroglifos de la Cueva del Diablo y de Los Santos sin Cabeza fueron realizados durante la época precolombina, entre los años 300 d.C. a 500 d.C. es decir, con aproximadamente 1500 años de antigüedad; y corresponderían al Periodo de Desarrollo Regional (500a.C – 500d.C.). En La Cueva del Diablo se registraron 17 paneles, mientras que, en Los Santos sin Cabeza se identificaron 7 rocas con petroglifos (Vásquez, 2017).

El interés e importancia por el análisis de los petroglifos de la Cueva del Diablo, de acuerdo con Vásquez (2017), surgió principalmente debido a las secuelas del terremoto de Manabí,



el cual ocurrió el 16 de abril del 2016 y que, debido a su intensidad de 7.8  $M_W$ , se produjo un desplazamiento de las placas tectónicas (BBC Mundo, 2016). Los daños causados por el terremoto, de acuerdo con Vásquez (2017), junto a otros factores que ocurren en la Cordillera Costanera como el fenómeno de El Niño que conlleva al exceso de lluvia, deslaves, inundaciones, etc. ponen en riesgo a los petroglifos de la Cueva del Diablo (2017). Además, según Vásquez, el terremoto de Manabí de 2016 destruyó partes de los paneles que contenían a los petroglifos, ya que se desprendieron algunos fragmentos y estratos, destruyéndose así la información arqueológica contenida en ellos (2017). Así mismo, existen otros factores naturales para la destrucción de los petroglifos, según Martínez & Botiva, como la erosión, la radiación solar, el exceso de lluvia, exceso de humedad y la proliferación de líquenes o de hongos sobre las superficies rocosas (2014). Posteriormente, en febrero del 2017, el CIS de la USFQ, liderado por la profesora Josefina Vásquez, realizó una salida de campo para recopilar información en diferentes formatos tales como videos, fotografías, tablas, etnografías, etc. Posterior a la salida de campo, las fotografías quedaron archivadas en el laboratorio de arqueología del CIS de la USFQ.

El laboratorio de arqueología a través del Centro de Investigaciones Socioculturales junto al Instituto de MicroNanoelectrónica, ambos de la USFQ, decidieron realizar un análisis de las fotografías mediante el procesamiento digital de imágenes usando MATLAB. Los petroglifos de La Cueva del Diablo, según Vásquez (2017), son patrimonio arqueológico material en peligro de destrucción debido a las condiciones naturales y a su complicada ubicación.

Además, según Martínez & Botiva, un sitio arqueológico que contiene arte rupestre es un patrimonio de valor incalculable para la sociedad, ya que alberga evidencia que permite reconstruir parte de la herencia cultural de los antepasados (2014). Por tal razón, de acuerdo con Vásquez, el CIS de la USFQ presentó una propuesta de investigación al Instituto

Nacional de Patrimonio Cultural (INPC), Dirección Regional 4, con el objetivo de registrar y documentar los petroglifos para las futuras investigaciones arqueológicas (2017).

Finalmente, mediante el trabajo en conjunto entre ambos institutos, se decidió realizar un trabajo de procesamiento digital de imágenes con el fin de agilizar la investigación e interpretación de los petroglifos; y a su vez, desarrollar técnicas innovadoras dentro del estado del arte para el análisis arqueológico.

La metodología que se implementó en la presente investigación de ingeniería fue el procesamiento digital de imágenes con MatLab aplicados a petroglifos arqueológicos. Las diferentes técnicas de procesamiento que se aplicaron a las imágenes fueron: ecualización, técnicas de *denoising* como Perona-Malik y curvatura, para finalmente, aplicar técnicas para la detección de bordes: filtros verticales-horizontales, filtro Laplaciano, Filtro Log, filtro wavelet, entre otros. De todas las técnicas de procesamiento anteriormente mencionadas, se eligieron las más adecuadas, como también se descartaron las otras técnicas de procesamiento. Las técnicas de procesamiento digital de imágenes que se estudiaron en los petroglifos se los detalla a continuación.

## DESARROLLO DEL TEMA

### 1. Procesamiento digital de imágenes de petroglifos

El procesamiento de imágenes consiste en aplicar algoritmos que mejoren las imágenes de los petroglifos para el proceso de vectorización. Se implementaron dos etapas previas, las cuales son ecualización y *denoising* (eliminación de texturas) mediante técnicas de Perona-Malik y de Curvatura. Con dichos algoritmos se identifican aquellos que funcionen de mejor manera para cada petroglifo de acuerdo con nuestras necesidades y las del Laboratorio de Arqueología de la USFQ.

#### **Histograma**

En el análisis de imágenes, un histograma es la distribución de las intensidades de los píxeles que conforman la imagen en un rango de 256 niveles de grises y una amplitud de 0 a un máximo de 1 (Thyagarajan, 2006 & Pratt, 2001). En un histograma, de acuerdo con Thyagarajan, si los valores de intensidad de los píxeles son bajos, entonces la imagen es oscura y por ende los detalles de la imagen no son visibles (2006). Mientras que, si los valores de intensidad de los píxeles son altos, entonces la imagen es muy brillante y tampoco se puede visualizar los detalles de la imagen (Thyagarajan, 2006). En ambos casos, el contraste de la imagen es bajo por lo que requiere tratar antes de procesar mediante la ecualización.

#### **Ecualización**

La ecualización en una imagen permite ocupar toda la gama de tonalidades en la escala de grises en igual magnitud. Es decir, nos devuelve una imagen uniforme. De acuerdo con Pratt

(2007), para obtener una imagen ecualizada se debe realizar un análisis del histograma de dicha imagen. Lo que el histograma indica es el número de píxeles que corresponden a una determinada intensidad (Aproximación de la función de densidad de probabilidad). Una imagen sin ecualizar tiene un histograma como el que se indica en la figura 1 a, donde hay diferente número de píxeles para cada intensidad. Por otro lado, el histograma de una imagen ya ecualizada ( figura 1 b), se asemeja a una función paso, donde a cada intensidad le corresponde el mismo número de píxeles.

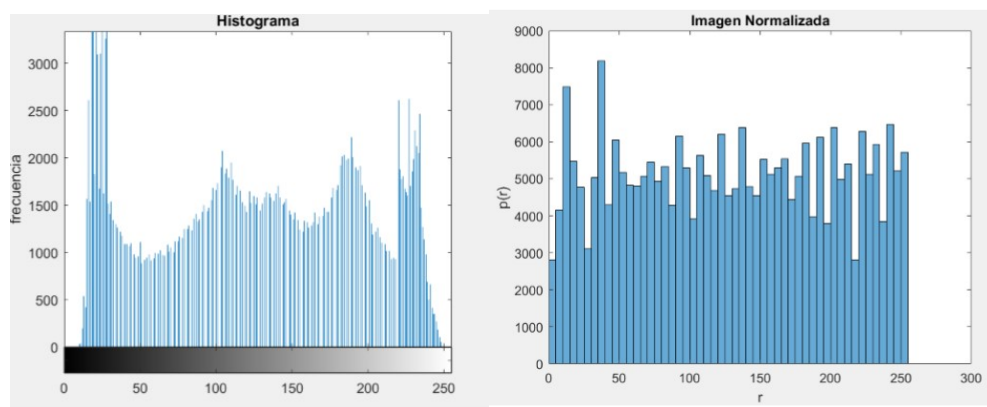


Figura 1. Histogramas: a) Histograma de una imagen sin ecualizar, b) Histograma de una imagen ecualizada.

Para el propósito del procesamiento digital de los petroglifos, una ecualización permite iluminar zonas muy oscuras y oscurecer zonas de mucha iluminación con la finalidad de no perder ciertos detalles en análisis posteriores y obteniendo un mejor contraste. Bertalmío (2014) en la sección de *Balance de Blancos* explica la importancia de escenas uniformemente iluminadas, ya que influye en la percepción del color del usuario.

En cuanto al aspecto matemático, Pratt (2007) indica que la ecualización de la imagen consiste en una transformación tal que:

$$s = T(x) = \int_0^r p_r(\alpha) d\alpha \quad (1)$$

Dicha transformación es aplicada a cada pixel de la imagen. En la sección de Resultados se puede observar la comparación de los diferentes petroglifos con la imagen ecualizada.

### **Técnicas de *denoising***

Se utilizaron técnicas de *denoising* o eliminación de ruido para suavizar las imágenes y de esta manera eliminar información no relevante de texturas de vegetación o propias de las rocas. En esta segunda etapa del procesamiento se aplicaron las técnicas: Perona-Malik y Curvatura.

### **Perona Malik**

La técnica de difusión anisotrópica permite reducir el ruido de una imagen sin afectar los bordes o las líneas (Perona & Malik, 1990). El modelo de difusión anisotrópico, de acuerdo con Perona & Malik, es un proceso que genera imágenes parametrizadas de forma sucesiva y cada vez más borrosas (1990). La difusión anisotrópica es una transformación espacio-variante no lineal con respecto a la imagen original, donde ocurre un suavizado de forma adaptada, para conservar así las líneas y curvas de la imagen (Perona & Malik, 1990); además, es un proceso iterativo que genera imágenes sucesivas cada vez más suavizadas. Según Perona & Malik (1990), la ecuación de difusión anisotrópica se define como:

$$I_t = \text{div}(c(x, y, t)\nabla I) = c(x, y, t)\Delta I + \nabla c \cdot \nabla I \quad (2)$$

el cual se reduce a la ecuación de difusión de calor isotrópico:

$$I_t = c\Delta I \quad (3)$$

si  $c(x, y, t)$  es constante.

El suavizado ocurre cuando el coeficiente de conducción es 1 en el interior de las regiones y 0 en los límites; tal que, el desenfoque ocurre en cada una de las regiones y se conservan los

límites (Perona & Malik, 1990). Para esto, también se requiere realizar una estimación de la ubicación de los límites. Si  $E(x, y, t)$  es la estimación aplicada, Perona & Malik (1990) consideró las siguientes propiedades:

- 1)  $E(x, y, t) = 0$ , en el interior de cada región.
- 2)  $E(x, y, t) = Ke(x, y, t)$ , en cada punto del borde.

Aquí,  $e$  es el vector unitario normal en el borde del punto, mientras que  $K$  es el contraste local del borde. De acuerdo con Perona & Malik (1990), el coeficiente de conducción  $c$  puede definirse en función de la magnitud del estimador  $E$ , tal que:

$$c = g(|E|) \quad (4)$$

El valor de  $g(\cdot)$  tiene que ser una función no negativa monótonamente decreciente con  $g(0) = 1$ . Así, las magnitudes grandes del estimador  $E$  no afectan los bordes. Una propiedad importante en la ecuación de difusión, según Perona & Malik (1990), es el criterio de causalidad, donde el coeficiente de conducción es la función de la magnitud del gradiente de la función de brillo, por lo que:

$$c(x, y, t) = g(|I_x(x, y, t)|) \quad (5)$$

Ahora,  $c$  está en función del gradiente de  $I$ , tal que  $c(x, y, t) = g(I_x(x, y, t))$ . Si  $\phi(I_x) = g(I_x)$ .  $I_x$  ya que existe el flujo de  $c$ .  $I_x$ .

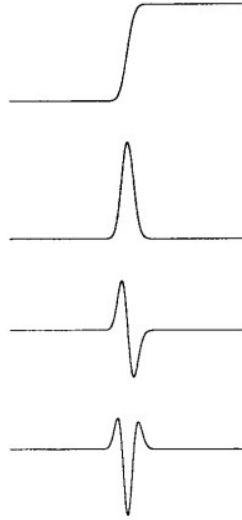


Figura 2. De arriba hacia abajo: función paso y su primera, segunda y tercera derivada, respectivamente.

Figura tomada de (Perona & Malik, 1990)

La ecuación de difusión en una dimensión es:

$$I_t = \frac{\partial}{\partial x} \phi(I_x) = \phi'(I_x) \cdot I_{xx} \quad (6)$$

De acuerdo con Perona & Malik (1990), lo que interesante es analizar la variación en tiempo de la pendiente del borde:  $\partial/\partial t(I_x)$ . Si  $c(\cdot) > 0$ , la función  $I(\cdot)$  es difusa y el orden de la diferenciación es invertida:

$$\frac{\partial}{\partial t}(I_x) = \frac{\partial}{\partial x}(I_t) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial}{\partial x} \phi(I_x) \right) \quad (7)$$

$$= \phi'' \cdot I_{xx}^2 + \phi' \cdot I_{xxx} \quad (8)$$

En el punto de inflexión  $I_{xx} = 0$  y  $I_{xxx} \ll 0$ , corresponde al punto de máxima pendiente, ver figura 3. Si  $\phi'(I_x) > 0$ , la pendiente del borde decrece con el tiempo; mientras si  $\phi'(I_x) < 0$  la pendiente del borde aumenta con el tiempo (Perona & Malik, 1990). Las ideas de difusión anisotrópica, escalamiento de espacio y detección de bordes, fueron evaluadas experimentalmente por Perona & Malik, mediante la discretización, donde los valores de los

brillos están asociados a los vértices y al coeficiente de conducción (1990). Por ende, utilizaron la discretización de los 4 vecindarios del operador Laplaciano:

$$I_{i,j}^{t+1} = I_{i,j}^t + \lambda [c_N \cdot \nabla_N I + c_S \cdot \nabla_S I + c_E \cdot \nabla_E I + c_W \cdot \nabla_W I]_{i,j}^t \quad (9)$$

donde  $0 \leq \lambda \leq 1/4$  y  $N, S, E, W$  se refieren a la dirección de los vecindarios Norte, Sur, Este y Oeste (Perona & Malik, 1990). El operador  $\nabla$ , en este caso, según Perona & Malik, representa la diferencia más cercana a los vecindarios y mas no al operador laplaciano; por lo que se tiene:

$$\nabla_N I_{i,j} \equiv I_{i-1,j} - I_{i,j} \quad (10)$$

$$\nabla_S I_{i,j} \equiv I_{i+1,j} - I_{i,j}$$

$$\nabla_E I_{i,j} \equiv I_{i,j+1} - I_{i,j}$$

$$\nabla_W I_{i,j} \equiv I_{i,j-1} - I_{i,j}$$

El coeficiente de conducción actúa en cada iteración como una función de brillo del gradiente, por lo que:

$$c_{N_{i,j}}^t = g \left( \left\| (\nabla I)_{i+\frac{1}{2},j}^t \right\| \right) \quad (11)$$

$$c_{S_{i,j}}^t = g \left( \left\| (\nabla I)_{i-\frac{1}{2},j}^t \right\| \right)$$

$$c_{E_{i,j}}^t = g \left( \left\| (\nabla I)_{i,j+\frac{1}{2}}^t \right\| \right)$$

$$c_{W_{i,j}}^t = g \left( \left\| (\nabla I)_{i,j-\frac{1}{2}}^t \right\| \right)$$

Según Perona & Malik (1990), la aproximación de la norma del gradiente en el arco de cada localización con valores absolutos para cada dirección es:

$$c_{N_{i,j}}^t = g(|\nabla_N I_{i,j}^t|) \quad (12)$$



$$C_{S_{i,j}}^t = g(|\nabla_S I_{i,j}^t|)$$

$$C_{E_{i,j}}^t = g(|\nabla_E I_{i,j}^t|)$$

$$C_{W_{i,j}}^t = g(|\nabla_W I_{i,j}^t|)$$

La discretización conserva las propiedades de continuidad, por lo que el brillo de la imagen se conserva. Para  $g(\cdot)$  se usaron diferentes funciones obteniendo resultados similares, pero Perona-Malik experimentaron con:

$$g(\nabla I) = e^{-(\|\nabla I\|/K)^2} \quad (13)$$

$$g(\nabla I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\|\nabla I\|}{K}\right)^2} \quad (14)$$

Según Perona & Malik (1990), los escalamientos de espacio de las dos funciones anteriores son interesantes, ya que el primero detecta bordes de alto contraste sobre los oscuros; mientras que el segundo, las grandes regiones sobre los pequeños. Finalmente, de acuerdo con Perona & Malik, para  $K$  se utilizó un estimador de ruido de Canny igual al 90% del valor de la integración de cada iteración (1990).

### Curvatura

Otra técnica de acuerdo con Rudin, L. Osher, S. & E. Fatemi, que permite suavizar y eliminar las texturas del petroglifo es la curvatura.

$$\nabla I(x, y) = (I_x(x, y), I_y(x, y)) \quad (15)$$

$$I_x(i, j) = \frac{I(i + 1, j) - I(i - 1, j)}{2} \quad (16)$$

La ecuación anterior no es inestable, entonces:

$$I^{n+1}(i, j) = I^n(i, j) + \Delta t \beta \quad (17)$$

$$I_t = \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\vec{\nabla} I}{|\vec{\nabla} I|} \right) |\nabla I| = \nabla^2 I \quad (18)$$

$$k = \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\vec{\nabla} I}{|\vec{\nabla} I|} \right) \quad (19)$$

Por lo tanto, de acuerdo con Rudin, L. Osher, S. & E. Fatemi (1992),  $k$  es la curvatura que mantiene los bordes:

$$k(i, j) = \frac{I_{xx}I_y^2 + I_{yy}I_x^2 - 2I_xI_yI_{xy}}{(I_x^2 + I_y^2)^{3/2}} \quad (20)$$

$$k(i, j) = \frac{I_{xx}I_y^2 + I_{yy}I_x^2 - 2I_xI_yI_{xy}}{(I_x^2 + I_y^2)^{3/2}} \quad (21)$$

$$I_t = \beta |\nabla I| \quad (22)$$

$$\beta = \vec{\nabla} \cdot \left( \frac{\vec{\nabla} I}{|\vec{\nabla} I|} \right) = k \quad (23)$$

De acuerdo con la figura 3,  $k$  se define en función de  $p$ , tal que:

$$k(p) = \pm \frac{1}{R(p)} \quad (24)$$

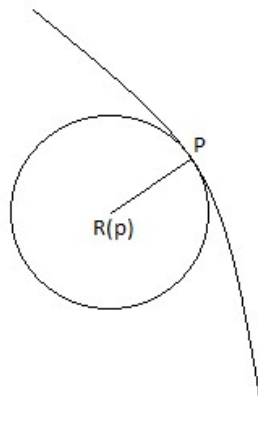


Figura 3. Circunferencia oscilatoria en la curvatura.

Figura tomada de (Rudin, L. Osher, S. & E. Fatemi, 1992)

Si es una línea recta, entonces:  $k(p) = 0$ ; mientras que si  $k(p)$  es muy grande, entonces la trayectoria de la curva es un pico (Rudin, L. Osher, S. & E. Fatemi, 1992).

### **Detección de bordes**

Los algoritmos de detección de bordes permiten realizar la vectorización de los petroglifos, para estos algoritmos se toma información de la imagen tal como discontinuidades, cambios en la luminancia, entre otros; esto es detectado mediante primera y segunda derivadas dependiendo de cada algoritmo. Para este proceso se utilizaron diferentes algoritmos como el filtro H +V, filtro Laplaciano, filtro LOG y transformada Wavelet.

### **Método de filtros horizontales y verticales**

Para este algoritmo se utiliza el método de diferencias centradas, de donde se obtiene un operador H y un operador V. Estos operadores son matrices que al realizar la convolución con la imagen del petroglifo se obtiene la detección de bordes del mismo.

El operador H (Ecuación ( 25) ) permite la detección únicamente de bordes horizontales, mientras que el operador V (Ecuación ( 26) ) detecta bordes verticales. Por este motivo, para obtener la detección en todas las direcciones es necesario la suma del resultado de ambas operaciones. (Pratt, 2007)

De acuerdo con Gonzalez (2008), para binarizar la imagen y controlar el rango de valores detectados como bordes se aplica un valor umbral. Esto permite que para cada imagen se pueda variar la detección hasta obtener el mejor resultado.

El umbral puede expresarse en función del valor máximo o del valor promedio de la imagen, su expresión se indica en la Ecuación ( 27), donde K es un valor determinado por el usuario.

En la Figura 4 se indica un ejemplo de los resultados obtenidos con este filtro.

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$V = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$th = K * \text{Max(Imagen)} \quad (27)$$

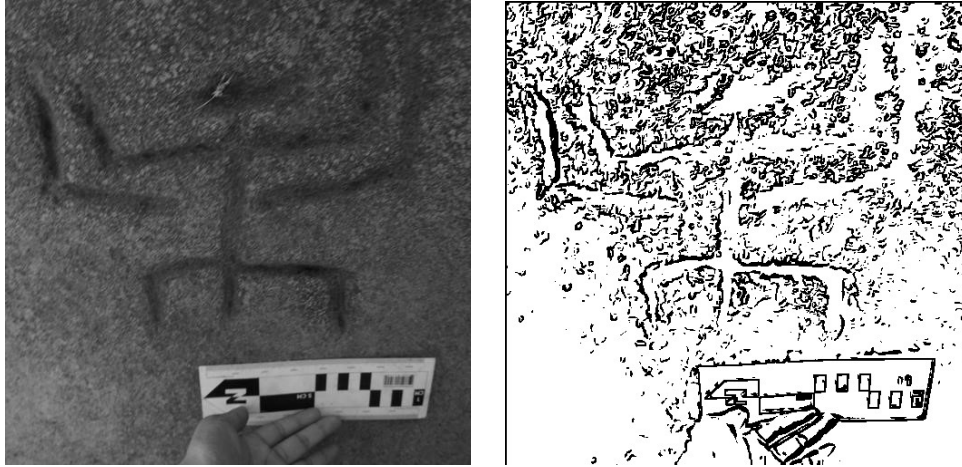


Figura 4. Comparación del petroglifo original con la detección de bordes por el método de filtros horizontales y verticales

### Método del Laplaciano

Este algoritmo realiza detección de bordes mediante la segunda derivada, por lo que se utiliza diferenciación hacia adelante y hacia atrás para obtener un nuevo operador que realiza la detección en todas las direcciones, lo cual nos lleva a la Ecuación (28), de donde se obtiene el operador laplaciano de la Ecuación (29). (Pratt, 2007)

$$\nabla^2 f(m, n) = f(m + 1, n) + f(m - 1, n) + f(m, n + 1) - 4f(m, n) \quad (28)$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

De igual manera, se realiza una convolución de la matriz L con la imagen. Como se mencionó anteriormente, es importante la aplicación de un valor umbral para controlar el nivel de

detección en cada imagen. (Gonzalez & Woods, 2008) En la Figura 5 se indica un ejemplo de un petroglifo luego de la aplicación del filtro.

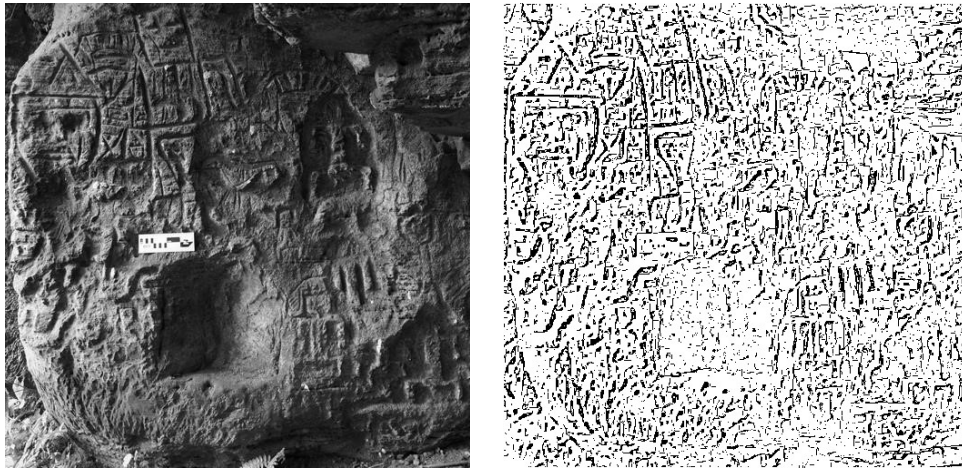


Figura 5. Comparación del petroglifo original con la detección de bordes por el método Laplaciano

### Método del filtro LOG

El filtro LOG, es conocido también como el *filtro del sombrero mejicano*, debido a su forma gráfica (Figura 6). Este filtro suaviza la imagen, elimina ruido y se deshace de bordes ficticios. Marr and Hildrith (Pratt, 2007) propusieron este método de detección de bordes basado en la segunda derivada, el cual detecta los cruces por cero, identificando de esta manera la ubicación de un borde. El modelo del filtro proviene de la ecuación ( 30), sin embargo aplicado a las imágenes se deriva la ecuación ( 31), donde  $\sigma$  es un valor ingresado por el usuario el cual determina el tamaño del filtro. (Pratt, 2007)

En los resultados, se asocia al  $\sigma$  con el grosor de los bordes que detecta. Un  $\sigma$  pequeño detecta bordes finos, mientras que un  $\sigma$  alto, detecta bordes gruesos.

$$LOG(m, n) = -\nabla^2\{f(m, \sigma)f(n, \sigma)\} \quad (30)$$

$$LOG(m, n) = \frac{1}{4\pi\sigma^4} \left(1 - \frac{m^2 + n^2}{2\sigma^2}\right) e^{-\frac{m^2+n^2}{2\sigma^2}} \quad (31)$$

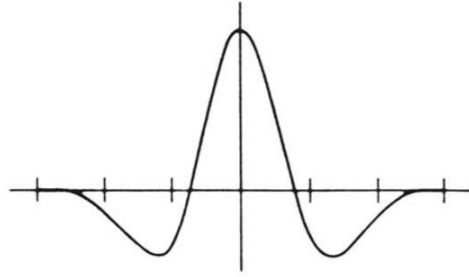


Figura 6. Respuesta del Laplaciano del Gaussiano

Figura tomada de (Pratt, 2007)

Además de la desviación estándar,  $\sigma$ , para controlar y obtener los resultados deseados, se aplica un valor umbral ingresado por el usuario al igual que en todos los filtros. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la aplicación de este filtro a uno de los petroglifos.



Figura 7. Comparación del petroglifo original con la detección de bordes por el método del filtro LOG

### Método de la transformada Wavelet

De acuerdo con Gonzalez, (2008) a pesar de que la transformada de Fourier ha sido muy utilizada para el procesamiento de imágenes, la transformada Wavelet es un nuevo método que está facilitando y mejorando el análisis de imágenes. Por este motivo se ha utilizado también este método para la aplicación con los petroglifos.

A diferencia de Fourier, cuya función base son las sinusoides, esta transformada utiliza pequeñas ondas de diferentes frecuencias y duración limitada. (Gonzalez & Woods, 2008)

En la Figura 8 se indica la diferencia, donde para el dominio del tiempo no se obtiene información sobre las frecuencias, en la FFT, no se tiene resolución en el tiempo, mientras que con la Wavelet la resolución del tiempo y la frecuencia varían, pero el área de cada ventana no.

A bajas frecuencias, las ventanas son más cortas pero amplias, es decir mejor resolución en frecuencia, pero poca resolución en tiempo. A altas frecuencias, el ancho de la ventana es más pequeño pero el alto es grande, por lo que se tiene una mejora en resolución de tiempo, pero poca resolución en frecuencia.

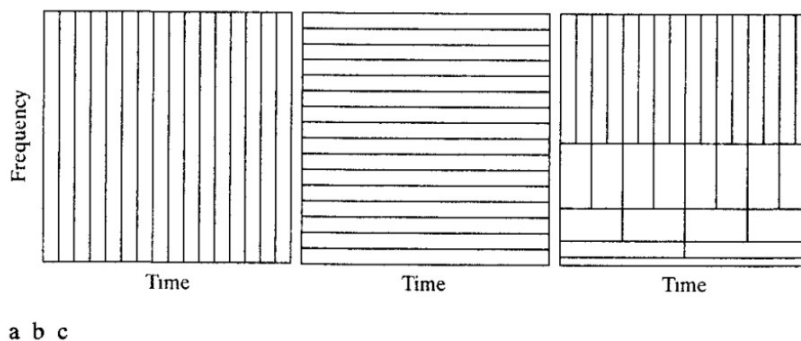


Figura 8. Diferencia entre a) tiempo muestreado b) FFT y c) FWT

Figura tomada de (Gonzalez & Woods, 2008)

La expresión de la transformada Wavelet se observa en la Ecuación ( 32) el módulo y en la Ecuación ( 33) el ángulo. (Gonzalez & Woods, 2008) A continuación, se aplica un valor umbral de acuerdo al resultado deseado.

La aplicación de este filtro aplicado a un petroglifo se observa en la Figura 9

$$Wf(m, n, 2^j) = \sqrt{|W^1 f(m, n, 2^j)|^2 + |W^2 f(m, n, 2^j)|^2} \quad (32)$$

$$\alpha = \arctan\left(\frac{W^2 f(m, n, 2^j)}{W^1 f(m, n, 2^j)}\right) \quad (33)$$

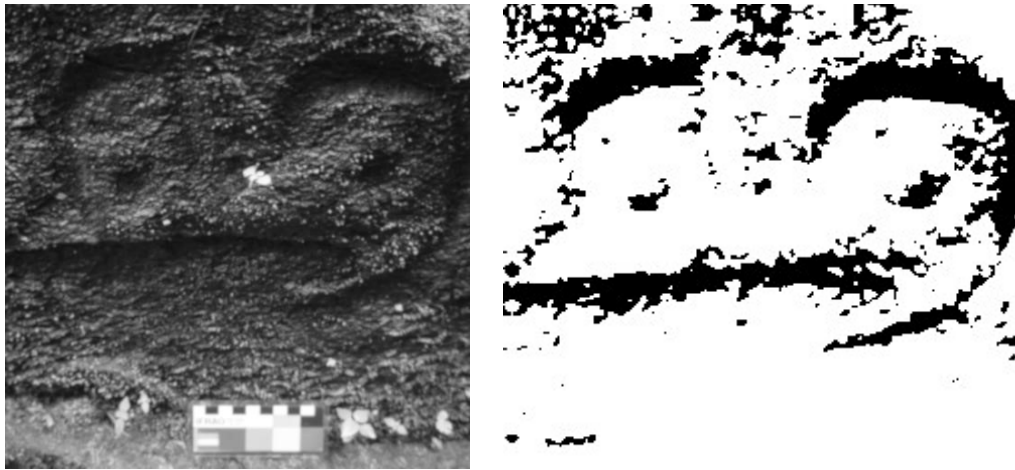


Figura 9. Comparación entre petroglifo original y con el método de detección de bordes Wavelet



## 2. Resultados

### La Cueva del Diablo

El petroglifo de la figura 10 proviene de La Cueva del Diablo, localizada en la cordillera costanera de Ecuador. Se aplicó en primer lugar una ecualización para el realce de la imagen, (Figura 10 b). Luego para el suavizado, se aplicó *denosing* mediante el método de curvatura, para así eliminar texturas.(Figura 10 c) Finalmente, para este petroglifo, se aplicó la detección de bordes con el filtro LOG, (Figura 10 d).



a) Imagen Original



b) Imagen Ecuilizada



c) Imagen Suavizada (Curvatura)



d) Imagen Vectorizada (Filtro LOG)

Figura 10. Resultado final del petroglifo 1

El petroglifo de la figura 11 es un panel localizado también en la cueva del Diablo. En el literal a), tenemos la imagen original del petroglifo, al cual se le realizó un realce mediante la técnica de ecualización. (ver figura 11 b) Para el suavizado de las texturas y demás ruidos presentes en el panel, se aplicó la técnica de *denoising* Perona-Malik. (ver figura 11 c) Finalmente, para la detección de bordes de este panel se utilizó la transformada wavelet, ver literal d). Si se compara el literal a) con d), se puede observar la mejora en el resultado final.



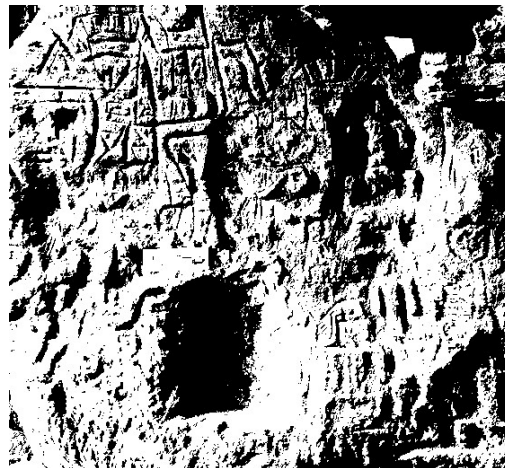
a) Imagen Original



b) Imagen Ecuilizada



c) Imagen suavizada (Perona-Malik)



d) Imagen Vectorizada (Wavelet)

Figura 11. Resultado final del petroglifo 2

### Los Santos sin Cabeza

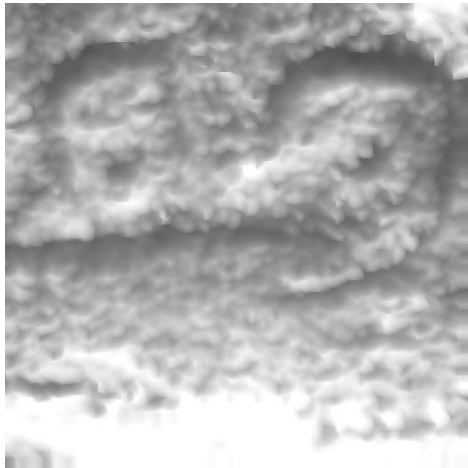
El petroglifo de la figura 12 fue fotografiada en el sitio Los Santos sin Cabeza, también localizados en la cordillera costanera de Ecuador. En a) se observa el petroglifo original, mientras que en b) se tiene la ecualización, con el cual se le dio realce a la imagen. En c) se le aplicó un suavizado mediante la técnica de *denoising* Perona-Malik. Finalmente, en d), se realizó la detección de bordes con la transformada Wavelet.



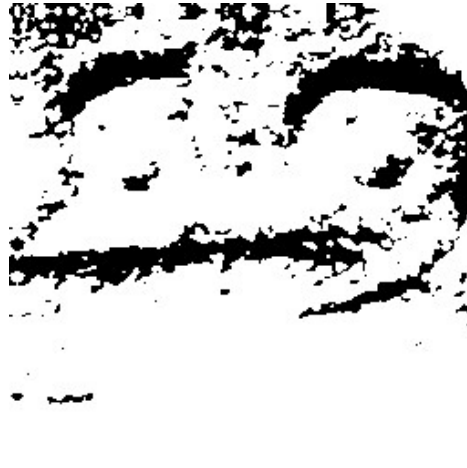
a) Imagen Original



b) Imagen Ecuilizada



c) Imagen suavizada  
(Perona-Malik)



d) Imagen Vectorizada (Wavelet)

Figura 12. Resultado final del petroglifo 3

El petroglifo de la figura 13 también fue obtenido del sitio Los Santos sin Cabeza. En el literal a) se muestra la toma de la imagen original del petroglifo. Luego se realizó la ecualización para el realce de la imagen. (ver Figura 13 b). Posteriormente, en el literal c), se aplicó la técnica de *denoising* mediante el método de Curvatura para el suavizado. Finalmente, en d) se aplicó una detección de bordes mediante el filtro LOG. El resultado final, en d), muestra al petroglifo de forma binarizada en comparación a la imagen original.



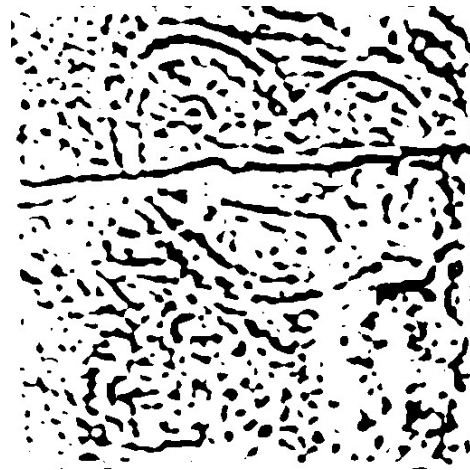
a) Imagen Original



b) Imagen Ecuilizada



c) Imagen Suavizada (Curvatura)



d) Imagen Vectorizada (Filtro LOG)

Figura 13. Resultado final del petroglifo 4

## CONCLUSIONES

Se desarrolló un método para vectorizar petroglifos mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes como son ecualización, *denoising* y detección de bordes. Este método es de gran importancia para la preservación de los petroglifos, puesto que es un método rápido y no invasivo, a diferencia de otros métodos utilizados que toman mucho tiempo o perjudican a los líquenes y adherencias de los petroglifos.

Al ser un método computacional se tiene ciertas dificultades al transformar una idea en algoritmos, en el caso de la detección de bordes dicha dificultad radica en la asociación de la escala, es decir la existencia de bordes gruesos ocurriendo en espacios pequeños y bordes delgados ocurriendo en espacios muy grandes. (Bertalmío, 2014) Por este motivo se identificó que para cada petroglifo ciertos algoritmos funcionan mejor que otros, siendo los mejores el filtro LOG (con la variable  $\sigma$  se regula el grosor del borde a identificar) y la transformada Wavelet (Analiza tanto las frecuencias como el espacio en el que suceden).

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, por lo cual se presenta a este método como una contribución al ámbito arqueológico, así como también se motiva a la continuación de un mayor procesamiento de imágenes de petroglifos con nuevos algoritmos y enfoques, como son análisis de texturas, reconocimiento de patrones, entre otros, para finalmente integrarlos en una interfaz gráfica, la cual pueda ser una herramienta para análisis arqueológicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BBC Mundo. (16 de 04 de 2016). *BBC*. Recuperado el 05 de 04 de 2019, de BBC:  
[https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160416\\_ecuador\\_terremoto\\_magnitud\\_colombia\\_peru\\_bm](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160416_ecuador_terremoto_magnitud_colombia_peru_bm)
- Bertalmío, M. (2014). *Image Processing for Cinema*. Taylor & Francis Group.
- Gonzalez, R., & Woods, R. (2008). *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall.
- Martínez, D. &. (2004). *Manual de Arte Rupestre de Cundinamarca*. Bogotá: Instituto Colombiano de Antropología e Historia.
- Perona, P. &. (1990). Scale-Space and Edge Detection Using Anisotropic Diffusion. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 629-639.
- Pratt, W. (2007). *Digital Image Processing*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Rudin, L. O. (1992). Nonlinear total variation based noise removal algorithms. *Physica D* 60, 259-268.
- Thyagarajan, K. (2006). *Digital Image Processing with Application to Digital Cinema*. Oxford: Elsevier.
- Vásquez, J. (2017). *Rito e Icoografía Parietal en las Montañas de Manabí, Ecuador*. Propuesta de investigación entregada al Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (INPC) Dirección Regional 4. Quito: USFQ.