

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, INFORMÁTICA Y
MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



PROYECTO DE CURSO

“Detección y cuantificación del área en colonias de líquenes en geomateriales de importancia cultural en el centro arqueológico de Sacsayhuaman, Qenq’o, mediante procesamiento digital de imágenes”

Presentado por:

Espino Puma, Ruth Juana

Aguilar Sanchez, Elias Aldair

Salazar Roa, Davis Bremdow

Curso:

Procesamiento digital de imágenes

Profesor:

Ing. Ruben Dario Florez Zela

Octubre, 2025

Resumen

El presente trabajo impulsa la búsqueda y detección de especies orgánicas líquenes como elementos de deterioro en el material pétreo de los centros arqueológicos mediante el procesamiento de imágenes y técnicas de segmentación que brinden un panorama general del área afectada proponiendo así un proceso para estimar la gravedad y efecto de estas especies en el patrimonio cultural para mitigar su crecimiento y tomar medidas de mantenimiento.

Índice general

Índice de cuadros	VI
Lista de Tablas	VI
Índice de figuras	VII
Lista de Figuras	VII
1. Planteamiento del Problema	1
1.1. Problema General	1
1.2. Problemas Específicos	1
2. Antecedentes	2
2.1. Trabajos Relacionados	2
2.1.1. “Biota liquénica en el monumento arqueológico de Pawkarkancha Santuario Histórico de Machupicchu”	2
2.1.2. “Inhibición del crecimiento de líquenes y musgos en elementos líticos usados en la construcción de fachadas de iglesias patrimoniales cusqueñas aplicando nanoburbujas de aire”	2
2.1.3. Los líquenes y la degradación del patrimonio arquitectónico	3
2.1.4. “Determinación de la diversidad de líquenes saxícolas de tres sitios arqueológicos de Cajamarca”	3
2.1.5. “Macro-líquenes del Santuario Histórico de Machu Picchu”	4

3. Justificación	5
4. Objetivos	6
4.1. Objetivo General	6
4.2. Objetivos Específicos	6
5. Hipótesis	7
5.1. Hipótesis general	7
5.2. Hipótesis específicas	7
6. Alcances y Limitaciones	8
6.1. Alcance	8
6.2. Limitaciones	8
7. Marco Teórico	9
7.1. Líquenes	9
7.2. Cobertura Líquenica	10
7.3. Simbiosis líquénica	10
7.4. Biodeterioro	11
7.5. Patrimonio arqueológico	11
7.6. Deterioro pétreo	12
7.7. Segmentación de imágenes	13
7.8. Reflectancia espectral	13
7.9. Índices espectrales	14
7.10. Validación de campo	14
8. Metodología	15
8.1. Consideraciones y restricciones	15
8.2. Materiales y toma de muestras	15

ÍNDICE GENERAL	V
8.3. Procesamiento de muestras y segmentación mediante espectro	17
8.4. Estimación del área afectada mediante segmentación	17
8.5. Calculo del área afectada	17
8.5.1. Conteo directo de Píxeles y calibración espacial	18
8.5.2. Análisis de contornos y geometría computacional	18
8.6. Métodos de Validación Propuestas	18
9. Resultados Esperados	19
10. Contribuciones Originales Esperadas	20
Bibliografía	21

Índice de cuadros

Índice de figuras

7.1.	Organismo Líquen en una roca	9
7.2.	Superficie líquenica - área de ocupación	10
7.3.	Simbiosis entre especies Líquenicas - Líquen - fungo vegetal	11
7.4.	Patrimonio cultural - Sacsayhuaman Cusco	12
7.5.	Desgaste y/o biodeterioro piedra a causa de los líquenes	12
7.6.	Reflectancia espectral para determinar el tipo de planta en función a la longitud de onda en la luz reflejada	13
8.1.	Especificación de las cámaras para la recepción de muestras	16
8.2.	Muestreo pétreo afectado por un Líquen	16

1 | Planteamiento del Problema

1.1. Problema General

¿Cómo implementar un método basado en procesamiento digital de imágenes, que permita detectar y cuantificar el área afectada por líquenes en geomateriales de valor patrimonial, con el fin de optimizar las acciones de monitoreo y conservación preventiva?

1.2. Problemas Específicos

- ¿Cómo puede el procesamiento digital de imágenes identificar de manera confiable las zonas cubiertas por líquenes en las superficies rocosas?
- ¿Cómo validar la precisión de la técnica de procesamiento propuesto frente a métodos tradicionales de evaluación?

2 | Antecedentes

2.1. Trabajos Relacionados

2.1.1. “Biota liquénica en el monumento arqueológico de Pawkarkancha Santuario Histórico de Machupicchu”

Este estudio realizado por investigadores de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco publicado en el 2022, analizó la colonización de hongos liquenizados en muros arqueológicos del sitio de Pawkarkancha, ubicado en los valles Q'esqa y Pampacahuana. Empleó el método modificado de Mostacedo & Fredericksen (2000) para cuantificar la biota. Este trabajo constituye un referente metodológico relevante para investigaciones sobre biodiversidad liquénica en estructuras patrimoniales de piedra. Molina Navarrete et al. (2022).

2.1.2. “Inhibición del crecimiento de líquenes y musgos en elementos líticos usados en la construcción de fachadas de iglesias patrimoniales cusqueñas aplicando nanoburbujas de aire”

Este trabajo en conjunto realizado por investigadores de la Universidad Agraria de la Molina y la Universidad Andina del Cusco, publicado en el 2021, desarrollaron un diseño metodológico aplicado, descriptivo y explicativo en dos etapas, con el fin de evaluar la eficacia de las nanoburbujas de aire en la eliminación de patologías bióticas. En la primera etapa se caracterizaron las patologías mediante un muestreo no probabilístico de los elementos arquitectónicos de las fachadas de la Basílica Catedral y la Iglesia de la Compañía de Jesús, utilizando fichas de observación y mapeo digital. Se determinó que el 75 % de las rocas presentaban patologías, predominando las biológicas.

En la segunda etapa experimental se aplicaron nanoburbujas de aire a 20 especímenes líticos provenientes de las canteras de Rumicolca, Huacoto y Sacsayhuamán, con diferentes tiempos de exposición (10, 20 y 30 minutos). Los resultados demostraron que el tratamiento de 30 minutos logró eliminar completamente líquenes y musgos sin dañar el sustrato pétreo, consolidándose como una técnica reproducible, ecológica y

eficaz para la conservación del patrimonio lítico.(Valverde Flores et al., 2021)

2.1.3. Los líquenes y la degradación del patrimonio arquitectónico

En este estudio se aborda la influencia de los líquenes en los procesos de degradación y conservación del patrimonio arquitectónico. Estos organismos, resultado de la simbiosis entre hongos y algas, poseen una alta capacidad de colonización sobre superficies pétreas, incluidas aquellas de valor histórico. Los líquenes saxícolas, tanto epílíticos como endolíticos, generan biodeterioro a través de mecanismos mecánicos como la penetración y disgregación del sustrato, los me químicos, mediante la liberación de ácidos orgánicos, entre ellos el ácido oxálico, que modifica la composición mineral de la roca.

La eliminación de líquenes requiere una evaluación técnica cuidadosa, ya que su remoción puede dejar la piedra expuesta y favorecer una recolonización más rápida. Entre los métodos de limpieza empleados se incluyen la remoción mecánica manual, el hidrolavado y la aplicación de biocidas (como el hipoclorito de litio), aunque estos últimos pueden afectar la integridad del material. Por ello, las estrategias de conservación se complementan con tratamientos de consolidación e hidrofugación, destinados a reforzar la cohesión interna de la piedra y disminuir su porosidad.(Gamboa Osorio et al., 2017, Gamboa Osorio et al., 2017).

2.1.4. “Determinación de la diversidad de líquenes saxícolas de tres sitios arqueológicos de Cajamarca”

El estudio realizado en el año 2016 tuvo como objetivo evaluar la diversidad y abundancia de líquenes saxícolas en tres sitios arqueológicos del departamento de Cajamarca: Cumbemayo, Santa Apolonia y Ventanillas de Otuzco. La recolección de muestras se efectuó mediante espátulas y cinceles metálicos, asegurando la obtención de ejemplares en buen estado, los cuales fueron almacenados en sobres de papel secante, registrando previamente sus características morfológicas y del hábitat. La identificación taxonómica se realizó a través de claves especializadas y observación microscópica de estructuras reproductivas.

Para el análisis poblacional, se aplicaron parámetros de densidad poblacional (organismos/m^2), densidad relativa y dominancia, empleando el método del cuadrado para la estimación cuantitativa de la población liquénica. Esto permitió identificar 19 especies de líquenes saxícolas, destacando Cumbemayo como el sitio con mayor diversidad (13 especies), seguido de Ventanillas de Otuzco (5 especies) y Santa Apolonia (3 especies).Marino Valle (2016).

2.1.5. “Macro-líquenes del Santuario Histórico de Machu Picchu”

En 2015 realizaron el estudio con el objetivo de documentar y actualizar la liquenobiota de esta zona patrimonial del Cusco, aplicando una metodología tradicional de recolección e identificación.

El muestreo se efectuó en cuatro estaciones georreferenciadas —sitio ceremonial, subida a la montaña Machu Picchu, camino al puente Inca y alrededores del Inka Terra Hotel. Se recolectaron muestras en diferentes sustratos (rocas, troncos y cortezas), bajo autorización de la Resolución Directoral N.º 009-2012-AG-DGFFS-DGEFFS. Los métodos aplicados, lograron nuevos registros para el Perú y aportando una base científica para futuros estudios ecológicos y de conservación en los Andes peruanos. Núñez-Zapata et al. (2015)

3 | Justificación

Los muros incaicos representan una herencia cultural invaluable, cuya preservación ha sido un desafío constante. Durante décadas la detección y limpieza de líquenes en estas estructuras se realiza de manera tradicional, dependiendo del criterio y la experiencia de los encargados de mantenimiento. Sin embargo, la mala extracción de los líquenes puede generar consecuencias perjudiciales, como el crecimiento de otros microorganismos, debido a que las superficies expuestas y las alteraciones en la composición del geomaterial facilitan su crecimiento.

Ante este problema, el presente proyecto propone una herramienta tecnológica no invasiva basada en el procesamiento digital de imágenes, que permita identificar, cuantificar y monitorear la presencia de líquenes en superficies pétreas. Esta técnica contribuye a la conservación preventiva del patrimonio cultural, al ofrecer una evaluación precisa, continua.

La propuesta busca superar las limitaciones de los métodos visuales tradicionales, aportando mayor precisión, escalabilidad y capacidad de análisis, con el fin de establecer estrategias más efectivas de mantenimiento y control del crecimiento de líquenes en parques arqueológicos.

4 | Objetivos

4.1. Objetivo General

Analizar imágenes de líquenes presentes sobre las rocas incaicas mediante técnicas de procesamiento digital, con el fin de identificar patrones de crecimiento y contribuir a la prevención del deterioro de las estructuras patrimoniales.

4.2. Objetivos Específicos

1. Capturar y organizar un conjunto de imágenes de alta resolución de superficies pétreas incaicas afectadas por líquenes.
2. Aplicar métodos de segmentación y clasificación de imágenes para identificar y cuantificar la presencia de líquenes.
3. Evaluar el impacto de la colonización de líquenes en el patrimonio histórico pétreo de los centros arqueológicos.
4. Desarrollar un modelo de análisis comparativo que relacione el nivel de cobertura de líquenes con el grado de deterioro observable.
5. Proponer estrategias preventivas basadas en los resultados obtenidos para la conservación del patrimonio lítico incaico.

5 | Hipótesis

5.1. Hipótesis general

El análisis digital de imágenes de líquenes sobre rocas incaicas permite identificar patrones cuantificables de deterioro superficial, posibilitando la detección temprana de daños y la implementación de medidas de alerta para realizar acciones preventivas efectivas por parte del personal encargado en los centros arqueológicos.

5.2. Hipótesis específicas

1. Las técnicas de segmentación y clasificación de imágenes permiten distinguir de manera precisa las áreas cubiertas por líquenes en superficies pétreas incaicas.
2. Existe una correlación significativa entre la densidad de líquenes y el grado de alteración superficial de las rocas.
3. El uso de modelos digitales de análisis contribuye a la toma de decisiones en la conservación preventiva del patrimonio arqueológico.

6 | Alcances y Limitaciones

6.1. Alcance

El presente estudio se centra en el análisis de imágenes digitales de líquenes que crecen sobre estructuras líticas incaicas, particularmente en zonas arqueológicas seleccionadas del Cusco. Se abordará el uso de técnicas de procesamiento y análisis de imágenes para identificar la extensión y tipo de colonización biológica, con el propósito de aportar información útil para la conservación del patrimonio. Los resultados permitirán establecer indicadores visuales y cuantitativos de deterioro, aplicables en programas de monitoreo y gestión patrimonial.

6.2. Limitaciones

- El estudio se limita a la identificación visual de líquenes mediante imágenes, sin incluir análisis microbiológicos o químicos de laboratorio.
- Las condiciones de iluminación, clima y resolución de las imágenes pueden afectar la precisión del reconocimiento de líquenes.
- La investigación se circunscribe a un número limitado de sitios y muestras, por lo que los resultados no pueden generalizarse a todo el patrimonio incaico.
- El modelo propuesto se centra en la detección temprana de deterioro, pero no aborda directamente procesos de restauración física.
- El reconocimiento de los líquenes se limita a estructuras pétreas uniformes sin deformaciones pronunciadas como las que se esperarían en los monumentos.

7 | Marco Teórico

7.1. Líquenes

Los líquenes son organismos simbióticos formados por la asociación entre un hongo y un alga (o cianobacteria). Esta simbiosis les permite colonizar sustratos difíciles, como superficies rocosas y piedras de monumentos arqueológicos, donde otros organismos no podrían sobrevivir. Su capacidad para fijarse en estas superficies los convierte en organismos pioneros en los procesos de colonización biológica. Gamboa Osorio et al. (2017)

Sin embargo, la presencia de líquenes en monumentos y construcciones históricas puede ser un factor significativo de biodeterioro. Al crecer sobre la piedra, su talo puede retener humedad que promueve la meteorización física y química, además de provocar la desagregación mineral. Por ello, es crucial entender su biología para diseñar estrategias eficaces de conservación del patrimonio pétreo en centros arqueológicos.



Figura 7.1: Organismo Líquen en una roca

7.2. Cobertura Líquenica

La cobertura líquenica se refiere a la extensión o superficie ocupada por las colonias de líquenes sobre un sustrato, en este caso, las piedras de monumentos arqueológicos. Un alto nivel de cobertura puede indicar un proceso avanzado de colonización que puede acelerar el deterioro del material.

La cuantificación de la cobertura líquenica es vital para monitorear la integridad de las piedras y evaluar la efectividad de tratamientos conservacionistas. Estos datos permiten identificar zonas críticas donde la acción de los líquenes es más intensa y donde las medidas de conservación deben ser prioritarias para proteger el patrimonio. Gamboa Osorio et al. (2017)



Figura 7.2: Superficie líquenica - área de ocupación

7.3. Simbiosis líquenica

La simbiosis líquenica es la relación mutualista entre hongos y algas o cianobacterias que da lugar al organismo visible como líquen. Esta asociación es fundamental para la resiliencia de los líquenes, permitiéndoles sobrevivir en ambientes extremos y colonizar materiales sólidos.

Esta particularidad implica que los líquenes tienen mecanismos adaptativos que favorecen su persistencia sobre las piedras, complicando su eliminación y aumentando el riesgo de biodeterioro en monumentos arqueológicos. Comprender esta simbiosis es clave para desarrollar tratamientos que respeten la estabilidad del monumento mientras controlan el crecimiento del líquen.



Figura 7.3: Simbiosis entre especies Líquenicas - Líquen - fungica vegetal

7.4. Biodeterioro

El biodeterioro es el proceso de degradación de materiales, en este caso rocas y piedras monumentales, causado por la acción de agentes biológicos como líquenes, hongos, bacterias y musgos. Estos organismos pueden alterar la estructura física y química de las piedras, debilitando su integridad.

En los centros arqueológicos, el biodeterioro representa una amenaza significativa para la conservación a largo plazo del patrimonio pétreo. La acción conjunta de microorganismos favorece la exfoliación, fisuración y cambio de color en las piedras, lo que puede llevar a la pérdida irreversible de información histórica y cultural contenida en los monumentos.

Según se cita de Gamboa Osorio et al. (2017)

7.5. Patrimonio arqueológico

El patrimonio arqueológico está constituido por los bienes culturales materiales de valor histórico, tales como monumentos, construcciones y artefactos que representan la herencia de civilizaciones pasadas. Las piedras que conforman estos elementos son testimonios materiales fundamentales para el estudio del pasado.

La conservación del patrimonio arqueológico implica proteger las piedras de la acción degradativa de factores biológicos como los líquenes. Su cuidado es esencial para preservar no solo la integridad física de los monumentos sino también el valor simbólico y cultural que estos representan para las generaciones presentes y futuras.



Figura 7.4: Patrimonio cultural - Sacsayhuaman Cusco

7.6. Deterioro pétreo

El deterioro pétreo es el conjunto de procesos que degradan la piedra, tanto por causas naturales como antropogénicas. Entre las causas naturales destacan la acción del agua, la temperatura, la contaminación atmosférica y la acción biológica como la de los líquenes, que provocan procesos físicos, químicos y biológicos que modifican la estructura y composición del material pétreo.

En contextos arqueológicos, el deterioro pétreo puede ser acelerado tras la excavación, que expone las piedras a condiciones ambientales nuevas. Es fundamental controlar agentes como los líquenes para evitar que el desgaste avance y se pierda información cultural contenida en las piedras.



Figura 7.5: Desgaste y/o biodeterioro piedra a causa de los liquenes

Según se cita en Navarrete (2022)

7.7. Segmentación de imágenes

La segmentación de imágenes es una técnica de procesamiento digital que permite separar y clasificar distintas zonas dentro de una imagen, facilitando el análisis específico de áreas afectadas por líquenes en las piedras. Es una herramienta útil para cuantificar la cobertura líquenica de manera objetiva y reproducible.

Esta técnica es importante para la conservación de monumentos porque posibilita la identificación temprana de zonas deterioradas y el monitoreo continuo del progreso del biodeterioro. Así se pueden tomar decisiones informadas sobre intervenciones conservacionistas y su seguimiento en el tiempo.

7.8. Reflectancia espectral

La reflectancia espectral mide la cantidad de luz que una superficie refleja en diferentes longitudes de onda. En el estudio de líquenes, la reflectancia espectral permite detectar y caracterizar la presencia de estas colonias sobre piedras mediante técnicas remotas o en campo.

Este método es valioso para la conservación porque permite evaluar la extensión y tipo de cobertura líquenica sin contacto físico con el monumento, minimizando daños y facilitando protocolos de monitoreo eficientes y no invasivos para la protección del patrimonio pétreo.

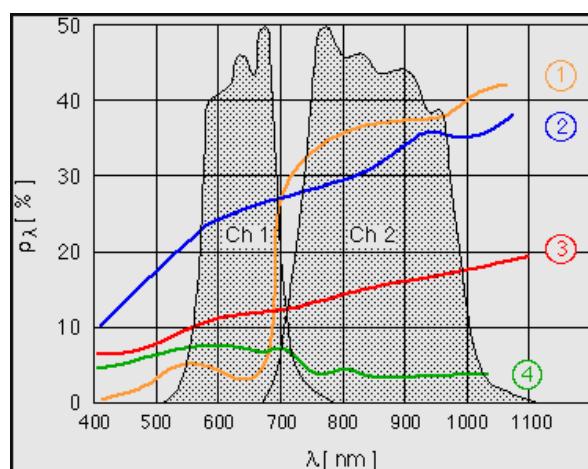


Figura 7.6: Reflectancia espectral para determinar el tipo de planta en función a la longitud de onda en la luz reflejada

7.9. Índices espectrales

Los índices espectrales son combinaciones matemáticas de reflectancias en diferentes bandas del espectro electromagnético que realzan características específicas de la superficie, como la vegetación o en este caso, la cobertura líquenica. Son herramientas útiles para detectar y cuantificar la presencia de líquenes en imágenes obtenidas por satélites o drones.

Estos índices permiten a los especialistas en conservación identificar patrones de colonización biológica y evaluar el impacto del biodeterioro en áreas arqueológicas. De esta forma, se optimizan las estrategias de conservación mediante un análisis más preciso y global.

7.10. Validación de campo

La validación de campo es el proceso de verificar *in situ* los datos obtenidos por técnicas remotas o analíticas, calibrando y confirmando la información sobre la presencia y extensión de líquenes en las piedras. Es un paso crucial para garantizar la fiabilidad de los estudios y tratamientos de conservación.

Esta validación es fundamental en centros arqueológicos porque asegura que las medidas de monitoreo y control del biodeterioro basadas en tecnologías avanzadas coinciden con la realidad física, permitiendo así intervenciones más efectivas y acertadas para preservar los monumentos.

8 | Metodología

El objeto de estudio se encuentra localizado en la superficie rocosa de los centros arqueológicos y/o monumentos en el ciudad de Cusco, es así que para la detección y estimación del área que ocupa se tendrá en cuenta un enfoque pseudo-multiespectral dentro del espacio y rango visible [380nm - 760nm] para la obtención de imágenes RGB para su posterior procesamiento.

8.1. Consideraciones y restricciones

El enfoque propuesto restringe el espectro electromagnético al espectro visible para longitudes de onda entre correspondientes al rojo, verde y azul, dejando de lado así la radiación ultra violeta e infrarroja para el análisis de las muestras e imágenes capturadas, pudiendo aplicar de esta forma un método que no requiera de equipo de calidad y/o filtros de luz que incurren en un gasto considerable para su implementación.

Una vez establecidos los parámetros principales para el dispositivo receptor de luz y sus limitantes es necesario describir el espacio de estudio el cual se desarrollara en los centro arqueológico de Qenq'o y Sacsayhuaman pertenecientes a la ciudad del Cusco, siendo este lugar el preciso gracias al fácil acceso al patrimonio pétreo que lo conforman posibilitando la siguiente etapa que consiste en la recopilación de muestras (imágenes) de los muros afectados por el organismo simbionte (Liquen).

8.2. Materiales y toma de muestras

Para la toma de muestra y/o recolección de imágenes una vez en el sitio se harán uso de las cámaras de uso personal e integrados en los dispositivos móviles, la cual cuenta con las siguientes características:

- 3 cámaras posteriores
- Resolución: 50MP f/1.8 + 5.0 MP f/2.2 + 2.0 MP f/2.4

- Espacio de luz detectable en el espectro RGB

Y de la cual se puede destacar que el sensor de 50MP representa la cámara principal con una distancia focal de 1.8, mientras que la cámara de gran angular para un registro más amplio tiene una resolución de 5.0MP con una distancia focal de 2.2 y finalmente se tiene la cámara macro como 2.0MP con una distancia focal de 2.24 para la recepción de imágenes de alta resolución que se encuentran cerca al sensor y lente.



Figura 8.1: Especificación de las cámaras para la recepción de muestras

En la imagen previa se puede apreciar la disposición de cada cámara y su resolución correspondiente para el dispositivo móvil a emplear.

Una vez definidos los materiales necesarios para la toma de muestras se realizará una visita in situ para realizar una recopilación de fotografías del material pétreo afectado, siendo así que para cada caso se tendrá en cuenta diferentes indicadores desde diferentes ángulos y para diferentes tipos de iluminación según lo requerido para una recolección satisfactoria.



Figura 8.2: Muestra pétrea afectada por un Líquen

En la imagen superior se tiene una muestra de ejemplo el cual consiste en una figura pétrea afectada para la cual se realizará el procesamiento digital de la imagen

para el análisis espectral utilizando para tal propósito la librería open-cv (Python) y relacionadas para un análisis en los diferentes modos de color que nos permitan segmentar las áreas de importancia afectadas por la especie orgánica.

8.3. Procesamiento de muestras y segmentación mediante espectro

Para el procesamiento de muestras se consideraran 2 puntos divididos en el preprocesamiento de la imagen y la detección del área afectada teniendo en cuenta para ello el enfoque teórico visto hasta el momento el actual procedimiento contemplará un esquema dinámico mediante el uso de diferentes modos de color entre los que destacaran

- HSV (Hue,Saturation, Value)
- YUV (Luma, Croma (UV))
- YCbCr (Iluminación y cromado)
- LAB (Lightness, A, B)

u otros, considerando para caso la equalización entre otras transformaciones para la segmentación de la imagen según la reflectancia espectral de luz que los especímenes generan y que son captados por los sensores de las cámaras.

8.4. Estimación del área afectada mediante segmentación

Una vez procesadas las imágenes la siguiente etapa consta del reconocimiento del área afectada utilizando para ello un algoritmo de aprendizaje reforzado o Machine Learning mediante las tonalidades resultantes para cada pixel como resultado de la segmentación espectral aplicada mediante los modos de color y transformaciones ejecutadas, esto al no contemplar cierta uniformidad o linealidad para cada pixel, requiere de un modelo capaz de imitar el criterio humano agregando objetividad para aplicar cálculos precisos en función a la segmentación del espacio ocupado por el elemento orgánico híbrido.

8.5. Calculo del área afectada

Con la segmentación o detección del espacio afectado, el siguiente problema a resolver consiste en el cálculo del área siendo así que al tratarse de un método indirecto

una correcta equivalencia y por ende calibración por cada pixel y el área exacta que ocupa, acotando al mismo tiempo que este algoritmo sea eficiente en cuanto a recursos de hardware facilitando así su implementación en dispositivos de pocas capacidades, por tanto según estas características se hará uso de 2 propuestas.

8.5.1. Conteo directo de Píxeles y calibración espacial

Siendo el enfoque más directo para el cálculo de área que requiere como paso intermedio la calibración de la escala entre pixel y medida, es un procedimiento algorítmicamente eficiente en cuanto a velocidad y costo computacional y el cual consiste en realizar operaciones con la mascara de imagen y multiplicar a cada pixel del área previamente segmentada por la escala obtenida durante el proceso de calibración, como se menciona en FaMAF (2025)

Para su implementación se puede hacer uso de las librerías open-cv, numpy mediante el uso de funciones provistas por estas librerías, siendo su única limitante es que requiere contar con una superficie plana debido a que asume una equivalencia en área para pixel obtenido.

8.5.2. Análisis de contornos y geometría computacional

Muy parecido al anterior método este método en lugar de trabajar con superficies planas permite en análisis geométrico y cierta libertad en los ángulos, deformaciones y grados de inclinación no superior a los 15° lo cual no represente una limitante diferenciándose del primer método en resultados con discrepancias menores al 2% definidas en Caselles and Frangi (2005), siendo necesario para su implementación las bibliotecas previamente mencionadas en el método uno.

8.6. Métodos de Validación Propuestas

Para la validación de resultados el enfoque a seguir estará centrado en mediciones manuales del área afectada en bloques de pétreos de no importancia cultural de forma que su análisis se pueda estudiar para una validación de resultados iterativos en función a cada bloque de entrenamiento y obtención del área bajo los procedimientos establecidos.

Adicionalmente y a causa de la falta de estudios relacionados estrechamente con lo propuesto el método manual nos brinda una forma fiel de comprobación.

9 | Resultados Esperados

Finalmente como salida del procedimiento a implementar se busca crear un criterio para la detección del área afectada por los especies simbiontes líquenes mediante procesamiento digital de imágenes para el tratamiento correspondiente de las figuras pétreas afectadas con la institución correspondientes, limitándose este estudio al cálculo de área afectada y un indicador de alerta para realizar el mantenimiento de las zonas afectadas de forma objetiva al contar con un algoritmo para este objetivo.

El estudiante redactará los resultados que espera obtener al finalizar su proyecto o investigación.

10 | Contribuciones Originales Esperadas

En el aspecto general de la investigación planteada el estado del arte relacionado destaca métodos de extracción, toma de muestras físicas para la identificación de los diferentes organismos en los líquenes para comprender su interacción y posibles efectos sobre el patrimonio pétreo o incluso en investigaciones pioneras se busca la implementación y uso de los rayos x para realizar investigaciones menos invasivas para el estudio en el campo de la petrología, sin embargo a priori un análisis desde el punto de vista digital mediante el procesamiento de imágenes no se contempla como punto de partida para una solución es así que un procedimiento en función al análisis espectral sería un aporte no aplicado en la actual problemática y que puede ser punto de partida para futuras investigaciones en el campo creciente del procesamiento digital que cada vez cuenta con más y mejores equipos para analizar con mejor detalle incluso longitudes de onda no perceptibles por el ojo humano en el rango del ultravioleta e infrarrojo como se viene aplicando con las cámaras hiperespectrales y multiespectrales.

Las principales contribuciones de este trabajo pueden resumirse en:

- Análisis espectral de las especies simbiontes mediante el procesamiento de imágenes
- Propone el uso de un espacio limitado al RGB para el procedimiento limitando costos de implementación.
- Algoritmo de procesamiento basado en los diferentes modos de color y el reconocimiento del área afectada de forma inteligente.