

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE
EMPLEANDO LÍQUENES COMO INDICADORES EN LA
CIUDAD DE CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2017**

AUTORA:

Br. Jani Elisabet Mendoza Merino

ASESOR:

Blgo. Jesús Rascón Barrios

CHACHAPOYAS-PERÚ

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL
TORIBIO RODRÍGUEZ DE MENDOZA DE AMAZONAS**



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE
EMPLEANDO LÍQUENES COMO INDICADORES EN LA
CIUDAD DE CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2017**

AUTORA:

Br. Jani Elisabet Mendoza Merino

ASESOR:

Blgo. Jesús Rascón Barrios

CHACHAPOYAS-PERÚ

2018

DEDICATORIA

A Dios:

Porque su infinita gracia ha permanecido conmigo.

A mi padre, Gerardo:

Por su soporte, incondicional amor y apoyo constante, por su férrea confianza en mí.

A mi madre, Luisa:

Por mostrarme cómo vencer las adversidades y ser leal respaldo en momentos difíciles.

Jani Elisabet

AGRADECIMIENTO

Ésta investigación se ejecutó con el apoyo del Laboratorio de Investigación de Aguas y Suelos – LABISAG, del Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva - INDES-CES, de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas- UNTRM.

A los docentes Jesús Rascón Barrios, Danilo Edson Bustamante Mostajo y Martha Steffany Calderón Ríos, por su oportuna asesoría y orientación, durante la concretización de esta investigación

A todas personas que me apoyaron de diversas maneras en el proceso de esta investigación; docentes, colegas, amigos y familiares.

Jani Elisabet

**AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL TORIBIO
RODRÍGEZ DE MENDOZA**

Dr. POLICARPIO CHAUCA VALQUI

Rector

Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

Vicerrector Académico

Dra. FLOR TERESA GARCÍA HUAMÁN

Vicerrectora de Investigación

Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

VISTO BUENO DEL ASESOR

Yo, Blgo. Jesús Rascón Barrios, identificado con Carnet de Extranjería N° 001483863, investigador de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, asesor de la tesis:

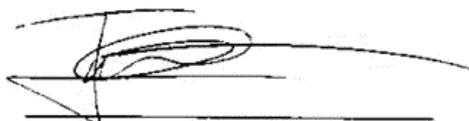
“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EMPLEANDO LÍQUENES COMO INDICADORES EN LA CIUDAD DE CHACHAPOYAS, AMAZONAS, 2017”

Presentado por la Bachiller en Ingeniería Ambiental, egresada de la UNTRM:

Jani Elisabet Mendoza Merino

Habiendo revisado el informe final de la tesis en mención doy la conformidad y el visto bueno para continuar con los trámites correspondientes.

Chachapoyas, 5 de mayo de 2018



Blgo. Jesús Rascón Barrios

Asesor de Tesis



ANEXO 2-N

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE LA TESIS

En la ciudad de Chachapoyas, el día 09 de Mayo del año 2018, siendo las 5:00 pm horas, el aspirante: Jani elisabet Mendoza Merino defiende públicamente la Tesis titulada: Evaluación de la calidad del aire empleando líquenes como indicadores en la ciudad de Chachapoyas, Amazonas, 2017 para optar el Título Profesional en Ingeniería Ambiental otorgado por la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, ante el Jurado, constituido por: Presidente: Dr. Miguel Ángel Barena Gurbollón Secretario: Dr. Oscar Andrés Gamarra Torres Vocal: Dra. Costula Alvarado Chuqui



Procedió el (los) aspirante (s) a hacer la exposición de los antecedentes, contenido de la tesis y conclusiones obtenidas de la misma, haciendo especial mención de sus aportaciones originales. Terminada la defensa de la tesis presentada, los miembros del jurado pasaron a exponer su opinión sobre la misma, formulando cuantas cuestiones u objeciones consideran oportunas, las cuales fueron contestadas por el los aspirante (s).

Tras la intervención de los miembros del jurado y las oportunas contestaciones del aspirante, el Presidente abre un turno de intervenciones para los miembros del jurado presentes en el acto, a fin de que formulen las cuestiones u objeciones que consideren pertinentes.

Seguidamente, a puerta cerrada, el jurado determinará la calificación global concedida a la tesis, en términos de:

Notable o sobresaliente (X) Aprobado () No apto ()

Otorgada la calificación el presidente del Jurado comunica, en sesión pública, la calificación concedida. A continuación se levanta la sesión.

Siendo las horas 7:18 pm del mismo día, el jurado concluye el acto de sustentación del Trabajo de Investigación.

Signature of the President

PRESIDENTE

Signature of the Secretary

SECRETARIO



CERTIFICADO de que esta copia fotostática es idéntica a la original. VOCAL CHACHAPOYAS 14 MAY 2018 Dra. Fernanda Isaac Espinoza Canaza FEDATARIO

OBSERVACIONES:



ANEXO 2-O

DECLARACIÓN JURADA DE NO PLAGIO

Yo Jani Elisabet Mendoza Merino

identificado con DNI N° 70316405

Estudiante de la Escuela Profesional de

Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Civil y ambiental

de la Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Amazonas.

DECLARO BAJO JURAMENTO QUE:

1. Soy autor de la Tesis titulada: Evaluación de la calidad del aire
empleando líquenes como indicadores en la ciudad de
Chachapoyas, Amazonas, 2017

La misma que presento para optar: el título de ingeniera Ambiental

2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas.
3. La tesis presentada no atenta contra derechos de terceros.
4. La tesis no ha sido publicada ni presentada anteriormente para obtener algún grado académico previo o título profesional.
5. Los datos presentados en los resultados son reales, no han sido falsificados, ni duplicados, ni copiados.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo toda responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra y/o invención presentada. Asimismo, por la presente me comprometo a asumir además todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse para LA UNTRM en favor de terceros por motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontraren causa en el contenido de la tesis.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones civiles y penales que de mi acción se deriven.

Chachapoyas, 16 de mayo de 2018

JURADO EVALUADOR



Dr. MIGUEL ÁNGEL BARRENA GURBILLÓN

PRESIDENTE



Dr. OSCAR ANDRÉS GAMARRA TORRES

SECRETARIO



Dra. CÁSTULA ALVARADO CHUQUI

VOCAL

ÍNDICE

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD	iii
VISTO BUENO DEL ASESOR	iv
JURADO EVALUADOR	vii
ÍNDICE	viii
LISTA DE TABLAS	ix
LISTA DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. OBJETIVOS	4
III. MARCO TEÓRICO	5
IV. MATERIAL Y MÉTODOS	17
V. RESULTADOS	27
VI. DISCUSIÓN	37
VII. CONCLUSIONES	39
VIII. RECOMENDACIONES	40
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
ANEXOS	47

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Zonas de contaminación	22
Tabla 2. Especies de forofitos y sus variables ambientales	27
Tabla 3. Líquenes cortícolas de la ciudad de Chachapoyas	29
Tabla 4. Valores del IPAM, su clasificación por forofito y por sectores	30
Tabla 5. Diversidad de Shannon Wiener (H) por sectores	31
Tabla 6. Normalidad de las variables	32
Tabla 7. Correlación de Spearman entre todas las variables por forofitos	33
Tabla 8. Prueba de diferencias significativas entre las variables por forofitos	33
Tabla 9. Prueba de diferencias significativas entre las variables por sectores	33
Tabla 10. Extracción de componentes principales	34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Flujo metodológico	17
Figura 2. Ubicación de los sectores para el estudio.	19
Figura 3. Ubicación de la grilla para cuantificación de los líquenes.	20
Figura 4. Distribución de la diversidad.	32
Figura 5. Componentes principales	34
Figura 6. Mapa de isocontaminación por forofitos	35
Figura 7. Mapa de isocontaminación por sectores.	36
Figura 8a. Especies de líquenes en Chachapoyas(a).	49
Figura 8b. Especies de líquenes en Chachapoyas(b).	50
Figura 9. Frecuencia de las especies de líquenes por sector	51

RESUMEN

En Chachapoyas, la principal ciudad de Amazonas, se realizó el estudio de calidad del aire empleando líquenes como indicadores, se recolectaron muestras de líquenes en 36 puntos divididos en seis sectores, a la par se colectó la corteza de los forofitos para medir su pH y se midió la humedad y la temperatura de dos forofitos por sector, para correlacionar la diversidad de líquenes y el Índice de Pureza Atmosférica Modificado (IPAM) con las variables ambientales y las especies de forofitos. Se identificaron 28 especies de líquenes encontrados en 15 especies de forofitos. Se aplicó el IPAM que relaciona la diversidad liquénica con la calidad del aire. Los factores evaluados como el pH de la corteza, las especies de forofito, temperatura y humedad del medio no se correlacionaron fuertemente con la diversidad liquénica. Con los datos del IPAM se realizaron mapas de isocontaminación, usando el interpolador Kriging en el programa ArcGis que muestra la distribución de la contaminación del aire de la ciudad, la misma que en general se encuentra contaminada, siendo el aire del sector centro el más contaminado, principalmente por SO₂ según la indicación liquénica.

Palabras clave: Bioindicadores, mapas de isocontaminación, calidad del aire.

ABSTRACT

In Chachapoyas, the main city of Amazonas, the air quality study was carried out using lichens as indicators, lichen samples were collected in 36 points divided into six sectors, at the same time the bark of the phorophytes was collected to measure their pH and the humidity and temperature of two phorophytes were measured by sector, to correlate the diversity of lichens and the Modified Atmospheric Purity Index (IPAM) with the environmental variables and the phorophyte species. We identified 28 species of lichens found in 15 species of phorophytes. The IPAM was applied that relates the lichen diversity with the air quality. The factors evaluated, such as the pH of the bark, the phorophyte species, temperature and humidity of the medium did not correlate strongly with the lichen diversity. With IPAM data, isocontamination maps were made, using the Kriging interpolator in the ArcGis program that shows the distribution of air pollution in the city, which is generally contaminated, with the air from the downtown sector being the most polluted, mainly by SO₂ according to the lichenic indication.

Keywords: *Bioindicators, isocontamination maps, air quality.*

I. INTRODUCCIÓN

La atmósfera se ve impactada negativamente en mayor magnitud por las actividades antrópicas, que en un contexto consumista (Ashmore, 2013), generan fuentes de contaminación fijas como las chimeneas de las industria que se ubican a bajas alturas (Romero, Olite, y Álvarez, 2006), tubos de escape industriales, calderas, extractores de los laboratorios académicos y termoeléctricas (Rubiano y Chaparro, 2006); y fuentes móviles como los vehículos de transporte (Caicedo *et al.*, 2013). Debido a los problemas respiratorios en humanos, la pérdida de biodiversidad y desplazamiento de especies, la contaminación del aire preocupa desde hace muchos años (Manning y Tiedemann, 1995), estos problemas afectan primero a los más vulnerables, tanto en humanos como en los ecosistemas (Ballester, Llop, Querol, y Esplugues, 2014), en este último un ejemplo común de especies vulnerable son los líquenes a los que contaminantes como el dióxido de azufre (SO₂) modifican su fisiología y morfología, cambiando el color, la forma y afectando su capacidad reproductiva inhibiendo el óptimo crecimiento de los propágulos lo que conlleva a la disminución de la cobertura y se reduce también la diversidad de especies presentes en el forofito (Gonzales, Luján, Navarro, y Flores, 2016)

Existen variables ambientales que influyen en la composición de las poblaciones de líquenes, tales como la orientación cardinal de la comunidad liquénica con respecto al forofito (Méndez y Campos, 2015), la cantidad y distribución de lluvia, la temperatura media anual (Giordani, 2007), el pH de la corteza del árbol hospedero (Agnan, Probst, y Séjalon, 2017), otro factor importante es la contaminación atmosférica, principalmente el dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno (Méndez y Campos, 2015; Gonzales Vargas *et al.*, 2016), cuyo origen en los sistemas urbanos está provocada mayormente por la combustión de combustibles fósiles, altamente consumidos para el transporte (Cortes, Cardona, Segura, y Garzòn, 2016; Gonzalez, Lingua, y Gudiño, 2012).

El uso de los líquenes con diversos fines, es cada vez más amplia (Hawksworth, Iturriaga, y Crespo, 2005). Son usados para determinar la calidad del aire, el cambio climático, la estabilización del suelo (Hawksworth *et al.*, 2005) la acumulación de metales pesados y radiactividad (Heslop y Green, 1988; Estévez *et al.*, 2011; Agnan *et al.*, 2017), para cuantificar el depósito de hidrocarburos aromáticos policíclicos (Gómez *et al.*, 2013), el monitoreo del efecto de pesticidas (Carrera y Carreras, 2011), el estado de la continuidad

ecológica (Gatica, Pereira, y Vallejos, 2011). La cronología de estructuras antiguas (Zilio, Hammond, y Castro, 2017) entre otros. Todo ello en base a los cambios observados en los líquenes y su estructura organizacional presente (Estrabou *et al.*, 2004; Giordani, 2007; Gonzalez *et al.*, 2012; Simijaca, Morales, y Vargas, 2014).

Los líquenes acumulan una variedad de sustancias en sus talos a niveles muy por encima de las concentraciones ambientales y de sus propias necesidades fisiológicas (Bajpai, Upreti, Nayaka, y Kumari, 2010), en este contexto existen líquenes resistentes y sensibles a la contaminación atmosférica (Agnan *et al.*, 2017). Los líquenes más sensibles podrían disminuir su cobertura (Bustamante, Monge, y Méndez, 2013) ya que si el contaminante daña al hongo o al alga, el otro se ve también afectado (Purvis *et al.*, 2003); por otro lado, los líquenes tolerantes solo muestran algunos cambios (Estrabou, Stiefkens, Hadid, Rodríguez, y Pérez, 2004), como la alteración de pigmento por la variación en la concentración de clorofila a y b (Bajpai *et al.*, 2010) y cambios en las estructuras vegetativas como el talo (Lijteroff, Lima, y Prieri, 2009), por lo que el estado ambiental de un ecosistema comúnmente puede ser determinado y monitoreado con el estudio de líquenes (Will-Wolf, Jovan, y Amacher, 2017), lo que se lleva a cabo a través de trabajos de campo y procesos estadísticos (Gonzales *et al.*, 2016).

Para los estudios se puede realizar un seguimiento pasivo (del tipo de esta investigación) o activo, según la metodología seleccionada; para los monitoreos pasivos, se estudian las comunidades de líquenes encontrados en el lugar de estudio, y se toman datos de interés y muestras para estudios de laboratorio según los objetivos del proyecto, mientras que en el estudio activo se trasplantan muestras de especies de líquenes en un buen estado inicial hacia la zona de interés, al término del tiempo de exposición se recogen los datos anotando los cambios que han sufrido y la disminución de área ocupada del líquen y otras variables relevantes (Caicedo *et al.*, 2013).

Para concretar los resultados se usan índices, el más utilizado es el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) que relaciona la riqueza de las comunidades de líquenes con la calidad del aire (LeBlanc y De Sloover, 1970), este valor junto con los de cobertura de líquenes se usan para generar mapas de isocontaminación, estableciendo isolíneas que relacionan los puntos de similar calidad de aire (Bustamante *et al.*, 2013). Este método se aplicó en Bolivia donde a través del IPA se logró identificar zonas de isocontaminación (Gonzales *et al.*, 2016), al igual que en el monitoreo de calidad de aire realizado por en Colombia

(Rubiano y Chaparro, 2006; Simijaca et al., 2014) y Costa Rica (Bustamante *et al.*, 2013). La humedad y temperatura son parámetros que se tienen en cuenta para hacer más sensible el IPA, aunque hay algunos estudios que muestran que no hay una relación directa entre la diversidad de líquenes y estos parámetros.

En la ciudad de Chachapoyas, según el (MINAM, 2014), los contaminantes atmosféricos como dióxido de azufre, generado por la combustión del carbón y petróleo, o el monóxido de carbono y material particulado relacionados principalmente con fuentes móviles son los de mayor incidencia, debido a que se encuentran en concentraciones que superan los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el aire, por lo que la ciudad fue declarada como Zona de Atención Prioritaria. La presencia de estos contaminantes en concentraciones que superen los ECA, genera problemas en la salud de las personas, como efectos en el tracto respiratorio y mortalidad prematura de causa cardiovascular, respiratoria y cáncer pulmonar (Tiempo, 2016); también el ambiente se ve impactado debido a la presencia de estos contaminantes, por lo que se desea conocer el estado actual de la calidad del aire usando líquenes como bioindicadores.

II. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Evaluar la calidad del aire empleando líquenes como indicadores en la ciudad de Chachapoyas.

2.2 Objetivos específicos

- Identificación de las especies de líquenes encontrados en la ciudad de Chachapoyas.
- Calcular el Índice de Pureza Atmosférica Modificado (IPAM) de la ciudad de Chachapoyas.
- Elaborar mapas de Isocontaminación con datos del IPA modificado, haciendo uso del programa ArcGis para la ciudad de Chachapoyas.
- Calcular el índice de Shannon-Wiener para las especies de líquenes encontrados en la ciudad de Chachapoyas.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 Antecedentes de la investigación

Gonzales *et al.*, (2016), en la ciudad de Cochabamba, Bolivia, usaron líquenes epifitos como indicadores de la calidad del aire, aplicando el Índice de Pureza Atmosférica (IPA). El trabajo se llevó a cabo en diversos parques de la ciudad, dos por cada zona y una zona testigo sin evidencia de contaminación, la zonificación de la ciudad se dio considerando las isotermas, isoyetas y geomorfología y se tomó como único forofito la especie *Fraxinus americana*. Tomaron datos de parámetros climáticos, contaminantes atmosféricos, cobertura y frecuencia de las comunidades liquénicas para cada punto de muestreo, los que se analizaron estadísticamente mediante correlaciones de Spearman, clasificación o Cluster y análisis de Senderos. Se concluyó que los líquenes epifitos se ven afectados por la contaminación atmosférica (principalmente por NO₂ y PM₁₀) y por parámetros climáticos y/o geomorfológicos. Con el cálculo del IPA se identificaron zonas de isocontaminación, empleando el programa ArcGis, donde áreas de mala calidad del aire fueron ubicadas en la zona sur y las áreas con mejor calidad del aire en la zona norte. Las especies más tolerantes a la contaminación global a *Candelaria concolor*, *Phycia pachyphylla*, *Pyxine nubila*, y las más sensibles fueron *Hyperphycia syncolla* y *Teloschistes chrysophthalmus*. Con ésta referencia queda fundado el estudio realizado, ya que se hace uso de los líquenes como bioindicadores de la calidad del aire y se obtiene un mapa de isocontaminación.

Ribeiro, Pinho, Branquinho, Llop, y Pereira, (2016) usaron interpoladores para relacionar la calidad del aire y la salud, logrando predecir la calidad del aire en lugares no muestreados y asignar exposiciones personales a la contaminación a partir de indicación con líquenes. Los métodos de interpolación usados fueron: Kriging de regresión (RK) y Kriging ordinario (OK). Estos métodos se usaron para generar simulaciones de calidad del aire con un algoritmo geoestadístico. Analizaron la asociación entre la calidad del aire y el peso al nacer. Datos personales de salud y datos de exposición fueron recolectados en Sines (Portugal) durante 2007-2010. Debido a que las estaciones de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad no ofrecen mediciones de resolución espacial alta, usaron datos de líquenes como un indicador ecológico de la calidad del aire. Y concluyeron que

OK daba mejores resultados, por lo tanto fue el método de interpolación usado en este estudio y así obtener los mapas de isocontaminación.

Con el fin de evaluar la resistencia o la sensibilidad a los metales de las especies de líquenes y mejorar las escalas de bioindicación, estudiaron los líquenes recogidos en zonas forestales remotas francesas y suizas. Luego del muestreo e identificación calcularon diversas variables ecológicas para caracterizar la calidad ambiental, incluyendo la diversidad del líquen, la abundancia del líquen y el índice de Shannon. Estimaron las características ecológicas para cada sitio de estudio en cada una de las siguientes variables luz, temperatura, continentalidad, humedad, pH del sustrato y eutrofización. A partir de las frecuencias del líquen, calcularon el índice de pureza atmosférica (IPA) y el valor de diversidad del líquen (DVL). Combinando la diversidad de líquenes y la bioacumulación de metales en un análisis de correspondencia, se evaluó la resistencia / sensibilidad a la contaminación atmosférica por metales de las especies de líquenes más frecuentes. Tras la validación mediante la eliminación de posibles influencias, ya que se midió el pH de las cortezas de las especies de forofitos seleccionados para cerciorarse que no sea una variable que interfiera en el estudio, se propuso una nueva escala para distinguir especies sensibles (como *Physconia distorta*, *Pertusaria coccodes* y *Ramalina farinacea*) de especies resistentes (como *Lecanactis subabietina*, *Pertusaria leioplaca* y *Pertusaria albescens*) a la contaminación de los metales de ese entorno forestal (Agnan *et al.*, 2017), en la evaluación de las influencias de los factores ambientales como el pH encontraron que con el DVL había una fuerte correlación. Pero Kaffer *et al.*, (2011) propusieron una evaluación de comunidades de líquenes en áreas urbanas en la ciudad de Viamão, en el sur de Brasil. Los líquenes evaluados en términos de composición, riqueza, cobertura y diversidad, y las estaciones de muestreo se clasificaron según el Índice de Pureza Atmosférica (IPA) complementado por el Factor de Clasificación Ambiental (ECF), el que evalúa factores ambientales incluidos el pH de la corteza. La conclusión a la que llegaron fue que el pH tenía una correlación baja ($r=-0,013$, $p<0,001$), ésta discrepancia en la literatura existente instó a evaluar ésta variable también, haciendo indistinto el forofito, al igual que la humedad y la temperatura.

En Perú, Ancash, Ramírez y Cano, (2005) realizaron un inventario de líquenes. El muestreo se realizó entre los 2 200 a 4 450 m.s.n.m.; se encontraron 38 especies y un

grupo imperfecto conformado por *Thamnolia vermicularis*. Se dieron a conocer claves para la identificación de familias, géneros y especies. Para cada especie se realizó una descripción macroscópica y microscópica y de reacción química (coloración con Potasio), también se describió el hábitat y el material examinado. De la misma manera este estudio deja un antecedente de la identificación de líquenes urbanos de la ciudad de Chachapoyas.

3.2 Bases teóricas

Indicadores biológicos

Los indicadores biológicos son los seres vivos que se emplean para conocer factores de su ambiente, lo que es bastante útil en estudios de contaminación. Estas especies tienen requerimientos físicos, químicos, de estructura del hábitat y de relaciones con otras especies; A cada especie o población le corresponden determinados límites de estas condiciones ambientales entre las cuales los organismos pueden sobrevivir, crecer y reproducirse (Puig, 2013).

Desarrollo y crecimiento de los líquenes

La diseminación del micobionte por medio de ascosporas, basidiosporas o conidios, tendiente a formar un líquen, está condicionada a que el micelio formado encuentre un alga apropiada y la reconozca por caracteres moleculares de las paredes superficiales, principalmente proteínas. Cuando inicia la liquenización la configuración es semejante a la de los soredios, con el mínimo de elementos formadores del líquen; Debido al contacto físico entre los simbioses lo que significa la penetración del hongo al fotobionte o su recubrimiento. Luego se organiza una estructura que se va diferenciando en la corteza superior y la corteza inferior; después crece y es diferente en el hábito a la especie en desarrollo. Todos estos procesos ocurren en forma lenta, donde el micobionte es el responsable del crecimiento del talo. (Chaparro y Aguirre, 2002).

Morfología y fisiología de los líquenes

La morfología de los líquenes es muy variada, ya que existen muchos tipos y formas intermedias entre los mismos (Gonzales, 2013). Los talos liquénicos tienen características fisiológicas que los diferencian de los hongos que no liquenizan: son poiquilohidros, es decir, no cuenta con cutícula protectora que garantice la retención de agua, adaptados al

medio atmosférico desecante, tienen un crecimiento lento, el talo puede vivir muchos años, el hongo obtiene los carbohidratos a partir de los sintetizados por el fotobionte y son capaces de colonizar los medios ambientales más extremos. Estas características requieren de un metabolismo y una fisiología precisos y originales, además un ajuste de las estructuras morfológicas y anatómicas relacionadas con su funcionamiento (Barreno y Pérez, 2003).

Los líquenes son miembros prominentes de organismos poiquilohidros, por lo que la cantidad del agua varía pasivamente con las condiciones ambientales circundantes por lo que tienden a desecarse relativamente rápidamente y como consecuencia, la disponibilidad de agua es de primordial importancia para su supervivencia y para explicar sus patrones de ocurrencia. Pero los líquenes son capaces de utilizar aparte de la lluvia otras fuentes de agua, tales como niebla y rocío. La simbiosis es ahora ampliamente aceptada como una fuente de innovación evolutiva que ha estimulado su enorme radiación morfológica. Las estructuras vegetativas han desarrollado especialmente a una complejidad que no se alcanza en ninguna otra parte del reino fúngico. La morfología y la anatomía del líquen se entienden actualmente como las limitaciones impuestas por el medio ambiente a la simbiosis mutualista. El crecimiento del líquen, debe funcionar como una unidad fotosintéticamente activa que permite una fotosíntesis neta positiva y posteriormente suficientes tasas de crecimiento, esto implica que el fotobionte tiene que ser suministrado con cantidad de luz adecuada. La difusión de dióxido de carbono (CO₂) que el fotobionte necesita se produce fácilmente, incluso en condiciones completamente hidratadas. La pérdida de agua debe adaptarse al ambiente específico: minimizado en ambientes secos, y maximizado en entornos muy húmedos. De este modo se puede conseguir una ganancia óptima de CO₂ (Nash, 2008).

Líquenes como indicadores de la calidad del aire

Los líquenes son organismos frecuentes en el ecosistema donde son importantes para mantener el equilibrio. El creciente interés por entender más acerca de sus interacciones con los factores abióticos ha motivado muchas investigaciones, algunas han demostrado su valor como bioindicadores de las condiciones climáticas y la calidad del aire de la zona urbana y rural (Fernandez, Molero, y Merzouki, 2010).

Los líquenes se encuentran entre los biomonitores más utilizados en el medio terrestre. Muchos líquenes son organismos de larga vida con una alta especificidad de hábitat por lo que pueden usarse para estimar la diversidad de especies y el potencial de hábitat en todos los tiempos. Los líquenes están extendidos en un rango de hábitats de condiciones extremas de calor o frío, desde desiertos a bosques lluviosos tropicales, desde ambientes naturales a manejados. Se pueden encontrar en todo tipo de sustratos como árboles, rocas y tierra, así como sustratos artificiales, permitiendo su uso como monitores biológicos de las condiciones ambientales. La mayoría de las especies están muy extendidas, crecen en más de un continente y el número de especies oscila entre diez y varios cientos (Nimis, Wolsele, y Scheidegger, 2000).

Se reconoce que una amplia gama de sustancias, incluyendo amoníaco, flúor, eutrofización, polvo alcalino, metales y radionucleidos, hidrocarburos clorados y lluvia ácida pueden ser detectados y monitoreados usando líquenes. Muchos países, en particular Francia, Alemania, Italia, Suiza, Países Bajos y Estados Unidos, utilizan líquenes para monitorear la contaminación difusa, tanto a nivel local como nacional. A continuación, se presentan razones por las que los líquenes han disfrutado de un éxito tan extraordinario en este campo:

- Los líquenes son omnipresentes y actualmente están aumentando en muchas áreas urbanas.
- Carecen de una cutícula externa protectora y absorben tanto los nutrientes como los contaminantes.
- Su naturaleza simbiótica. Si alguno de los simbiontes es dañado por la contaminación, se producirá un colapso de la simbiosis y, en última instancia la muerte del liquen.
- Son organismos perennes disponibles para monitoreo durante todo el año.
- Muchas especies de liquen acumulan altos contenidos metálicos sin presentar daños, permitiendo así el monitoreo en áreas amplias.
- Existen diferentes métodos que ofrecen oportunidades para todas las edades y habilidades.
- Los instrumentos son vulnerables al robo y al vandalismo, más los líquenes no.

En muchos estudios de biomonitorio se considera que los líquenes reflejan contaminación del aire, calidad del aire o pureza del aire, por medio de por ejemplo el Índice de Pureza Atmosférica (Nimis y Purvis, 2000).

Taxonomía de los líquenes

Se considera que los hongos liquenizados forman parte del Reino Fungi. La clasificación y denominación de los líquenes se refiere siempre al hongo o micobionte (Chávez, Lücking, Sipman, y Umaña, 2009). Desde el punto de vista de la taxonomía, los líquenes no constituyen un grupo natural sino biológico. En efecto, los líquenes son hongos (en su mayoría Ascomycetes), que se asocian con algas (Cloroficeas y Cianoficeas). En ésta asociación los hongos, denominados micobiontes, son los encargados de conformar generalmente la estructura talina o cuerpo vegetativo del liquen, y las algas o fotobiontes, los constituyentes fotosintetizadores. Esta asociación simbiótica es de carácter excepcional en la naturaleza, ya que entre otras se distingue por la particularidad de sus componentes para reconocerse mutuamente e interactuar en la biosíntesis de sustancias exclusivas a la simbiosis (Itatí, 2007).

El índice de pureza atmosférica y los mapas de isocontaminación

LeBlanc y De Sloover, (1970) relacionaron la diversidad de líquenes con la calidad del aire mediante una fórmula adimensional conocida como el índice de pureza ambiental (IPA), con cuyos resultados se realizaron mapas que reflejan los datos puntuales en áreas, clasificándolas en escalas de contaminación las que son similares a las más cercanas, éstos mapas de isocontaminación se realizaron con el uso de sistemas de información geográfica. Este tipo de material da un panorama en general de la calidad del aire de área de estudio.

Kriging

La operación que permite obtener los mapas de isocontaminación es el Kriging, que es un procedimiento geoestadístico avanzado que genera una superficie estimada a partir de un conjunto de puntos dispersados con valores z . El kriging está basado en modelos estadísticos que incluyen la autocorrelación, es decir, las relaciones estadísticas entre los puntos medidos. Las técnicas de estadística geográfica como el Kriging no solo tienen la

capacidad de producir una superficie de predicción sino que también proporcionan alguna medida de certeza o precisión de las predicciones (Esri, 2017).

Contaminación del aire en zonas urbanas

Las partículas, en especial las que provienen de procesos de combustión, pueden tener distintos tamaños que determinan el riesgo. Así aquellas muy grandes son detenidas en la primera parte del tracto respiratorio y, arrastradas por el mucus, terminan siendo deglutidas o expulsadas por la nariz. Las más pequeñas evitan estas defensas del aparato respiratorio y llegan a los alvéolos pulmonares donde pueden producir daños considerables, este es el principal problema para la salud de los seres humanos, pero los demás seres como los líquenes presentan cambios fisiológicos y poblacionales (Moretton, 2000). La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud. Mediante la disminución de los niveles de contaminación del aire se pueden reducir las cargas de morbilidad derivada de accidentes cerebrovasculares, cánceres de pulmón y neumopatías crónicas y agudas, entre ellas el asma (OMS, 2016).

Legislación sobre calidad del aire en Perú

En Perú los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y Límites Máximos Permisibles (LMP) para el aire son los parámetros que se deben respetar para evitar enfermedades y daños en los sistemas naturales y en la salud, aunque en el 2017, se ha modificado el parámetro para el dióxido de azufre (SO₂), elevándose de 20 a 250 µg/m, lo que supone aumentar en 12,5 veces el estándar anterior (MINAM, 2017). Las instituciones inmersas en el control de la Calidad del Aire en el Perú son el ministerio del ambiente (MINAM), La Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), El Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) los que brindan reportes e informes de la calidad del aire, legislan y toman acciones para garantizar un mejor ambiente para el desarrollo de los ciudadanos.

3.3 Definición de términos básicos

Líquenes

Corresponden a una asociación simbiótica entre un hongo y uno o más organismos autótrofos fotosintéticos que puede ser un alga verde o una cianofícea; de esta unión

resulta un talo morfológicamente diferente a cada uno de sus componentes (Chávez *et al.*, 2009).

Contaminación del aire

La contaminación del aire es cualquier alteración de su composición natural, por la presencia en la atmósfera de compuestos que tienen efectos adversos sobre el ser humano y sus bienes materiales, así como también sobre los animales y las plantas. La contaminación del aire es la presencia de sustancias que normalmente no son componentes de la atmósfera y principalmente son el monóxido de carbono, dióxido de azufre (principal contaminante que afecta a los líquenes), ozono y partículas suspendidas de plomo (ECURED, 2008).

Bioindicadores

Especie o la interacción de especies que tiene requerimientos particulares con relación a uno o más variables físicas o químicas, tal que los cambios de presencia/ausencia, número, morfología o de conducta de esa especie en particular, indique que las variables físicas o químicas consideradas, se encuentran cerca de sus límites de tolerancia (Montilla, 2014).

Sector

Subdivisión del área de estudio, que en este caso fueron seis: centro (C), este (E), norte (N), oeste (OE), sur (S) y sureste (SE).

Zona de isocontaminación

Rango de calidad de aire al que pertenece determinada área en estudio (por forofitos seis zonas y por sectores cuatro zonas).

IPAM

El Índice de Pureza Atmosférica modificado tiene sus bases con LeBlanc y De Sloover, (1970) que luego fue modificado, quedando entonces como Índice de Pureza Atmosférica Modificado (IPAM), es un índice biológico que toma en cuenta la frecuencia, cobertura, el número de forofitos por estación y el factor de resistencia de cada especie en una misma

área, donde la contaminación existente puede producir alteraciones en la estructura de las poblaciones liquénicas. La pérdida selectiva de individuos sensibles, se traduce en la alteración de la estructura de la comunidad de líquenes (Rubiano, 1988).

Calidad del aire

La calidad del aire es una forma de medir las condiciones del aire. El dióxido de carbono es una magnitud objetiva para determinar la calidad del aire. El ser humano respira este gas incoloro e inodoro que se muestra más activo en proporción directa con la edad y la corpulencia, presentado un serio problema de salud pública.

Mapas de Isocontaminación

Construidos a partir de los resultados del IPA_M ya que se asume que la determinación de áreas homogéneas en cuanto al comportamiento de las comunidades liquénicas corresponde a áreas similares por niveles de contaminación (Rubiano y Chaparro, 2006).

Índices de diversidad

Conjunto de herramientas estadísticas que muestran la riqueza de especies dentro de una determinada área, los que se pueden determinar incluso modificando los índices de dominancia (Moreno, 2001).

Sensibilidad

Es la medida de los cambios de una especie presentada a partir de un evento desfavorable o no, este parámetro se puede medir a partir de la observación de ausencia y presencia de la especie, según el gradiente de alteración del medio.

Forofito

Es la planta que actúa como el soporte para el desarrollo de las epífitas como los líquenes, este es un componente importante al caracterizar los líquenes y determinar su presencia por lo que se debe tener en cuenta su diámetro de altura de pecho, altura total y su inclinación (Rubiano, 1988).

Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ es un contaminante muy común en zonas donde existe transporte rodado ya que es aún un componente en los combustibles y los líquenes son capaces de retener y reaccionar ante la presencia de este contaminante. Al parecer, la mayor parte del azufre de los líquenes proviene de fuentes atmosférica, la alta solubilidad del SO₂ en agua, hace que cualquier líquen húmedo puede ser un principal sumidero de SO₂, incluso cuando no es metabólicamente activo. Este contaminante muy común en el área urbana puede afectar al líquen cambiándolo de color a un tono más amarillento, solo a altas concentraciones de este componente puede dañar a la mayoría de especies de líquenes (Nash, 2008).

Dióxido de carbono (CO₂)

El CO₂ es el gas de efecto invernadero más abundante es necesario para la fotosíntesis del líquen pero en concentraciones altas lo puede dañar (Nash, 2008), este gas es producido en todos los procesos de respiración y combustión completa por lo que es frecuente en todos los ambientes encontrarlo, en el área urbana es producido como subproducto del transporte y en ocasiones por las actividades industriales.

A continuación se indican definiciones de la morfología de los líquenes en base a lo expuesto por Barreno, (2009):

Apotecio

Estructura de reproducción sexual (ascocarpos) del hongo en forma de disco o de copa. El himenio tiene hifas fértiles, ascas que producen esporas e hifas estériles y cuando está maduro, queda expuesto al exterior. Siempre rodeado por un borde de distintos tipos que le permite sostenerse.

Soredio

Propágulo vegetativo exclusivo de líquenes. Consta de unas pocas células de fotobionte envueltas por una capa laxa de hifas, no sobrepasan las 50 µm, pueden ser farináceos o granulados en función del tamaño. Se originan, bien de manera difusa en la superficie del talo, o más comúnmente, en áreas delimitadas.

Talo

Cuerpo vegetativo de los líquenes que se forma mediante la asociación estable hongo-fotobionte y da como resultado la formación de un talo con una estructura que difiere de cualquiera de los simbioses en estado de vida libre. Los dos extremos de complejidad son los de estructura homómera y los de heterómera (dorsiventral). En ocasiones puede tener dos fotobiontes, en ese caso el primario es un alga verde y el secundario una cianobacteria.

Esporas

Células generativas que reproducen nuevos individuos sin necesidad de fusionarse. Las de origen sexual se forman después de meiosis en los ascos (ascosporas). Las de reproducción asexual se llaman conidios.

Epifito

Liquen que vive sobre las cortezas de las plantas leñosas (árboles y arbustos), sin estar conectado orgánicamente con ellas. El pH de las cortezas es un factor ecológico importante para algunos líquenes y de selección de la flora epífita.

Cortícula

Que crece sobre la corteza de plantas leñosas (árboles y arbustos).

Fruticuloso

En forma de pequeño arbusto. Talos con morfología de pequeños arbustos, o bien, en los que los lóbulos se estrechan y alargan profundamente de tal manera que se sujetan al sustrato por una mínima superficie (discos basales). Sobresalen siempre del sustrato y pueden ser erectos, colgantes, ascendentes o reptantes. La morfología y ramificación de estos talos es muy variada: desde pequeños arbustos, hasta los que tienen varios metros de largo, o los que casi no se ramifican.

Crustáceo

Tipo de talo que se encuentra siempre en estrecho contacto con el sustrato, carece de córtex inferior o de órganos de sujeción y no se puede separar de él sin destruirlo. Se sujeta al sustrato por medio de la médula o de un hipotalo.

Foliáceo

Laminar, en forma de hoja. Talo laminar, generalmente estratificado, con organización dorsiventral y cara inferior diferenciada; suele estar lobulado en los márgenes y es separable del sustrato.

IV. MATERIAL Y MÉTODOS

La metodología para la determinación de la calidad del aire en Chachapoyas usando líquenes epífitos, se resume en el siguiente flujo metodológico (Figura 1).

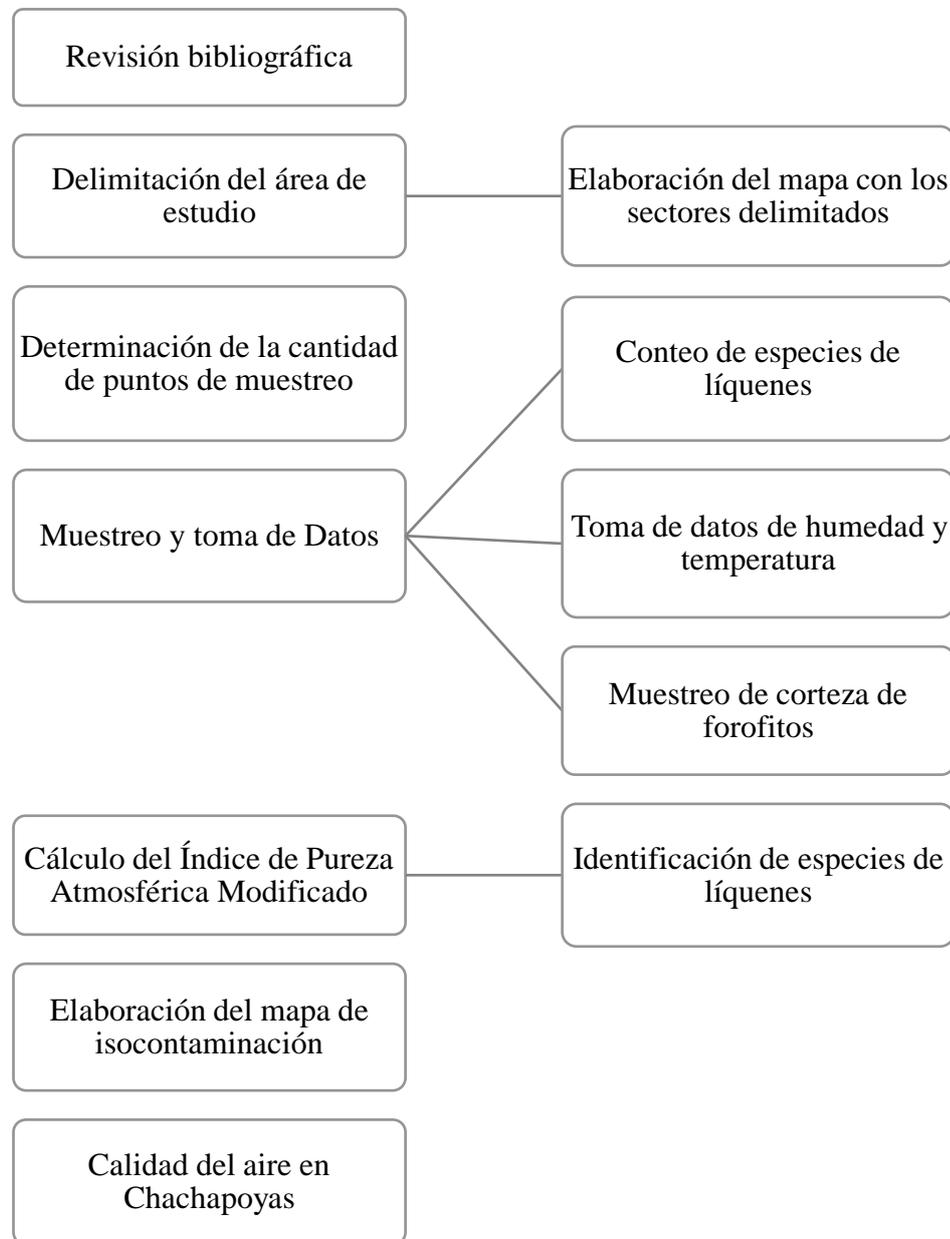


Figura 1. Flujo metodológico para la determinación de la calidad del aire de la ciudad de Chachapoyas usando líquenes.

4.1 Área de estudio

Los parámetros ambientales son cruciales para el desarrollo de los líquenes por lo que se describe lo siguiente: El estudio se realizó en la ciudad de Chachapoyas ubicada a 2 334 msnm, en la parte nor-oriental del país, cerca al río Utcubamba. En Chachapoyas, el clima es templado, los veranos son cortos, cómodos y secos; los inviernos son largos y frescos y está mayormente nublado durante todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 9 °C a 23 °C y rara vez baja a menos de 7 °C o sube a más de 25 °C (Spark, 2016).

4.2 Diseño de la investigación

El diseño del proyecto es un diseño de casilla única, presentando el siguiente:

M: —————> O

Donde:

M=Muestras: Forofitos seleccionados dentro de la ciudad de Chachapoyas.

O = Información de interés recogida en cada una de las muestras; el número y tipo de líquenes por cuadrante, pH de la corteza del forofito, la temperatura y la humedad ambiental en el forofito

4.3 Población, muestra y muestreo

- Población: Foresta que se encuentran dentro de la ciudad de Chachapoyas
- Muestra: Foresta seleccionada según la metodología usada por la literatura seleccionada
- Muestreo: De cortezas, abundancia y diversidad de líquenes, la humedad y temperatura ambiente en los forofitos

4.4 Métodos

Determinación de áreas de muestreo

Según la metodología utilizada por Lijteroff *et al.*, (2009), se procedió de la siguiente manera: El estudio se realizó en Chachapoyas y se subdividió el área urbana en seis

sectores, denominándolos como centro (C), este (E), norte (N), oeste (OE) sur (S), sureste (SE), y se cubrió una superficie aproximada de 12,3 ha. El sector Centro es el que agrupa la mayoría de las actividades comerciales y gubernamentales. Los otros cinco sectores están destinados principalmente al uso habitacional (Figura 2).

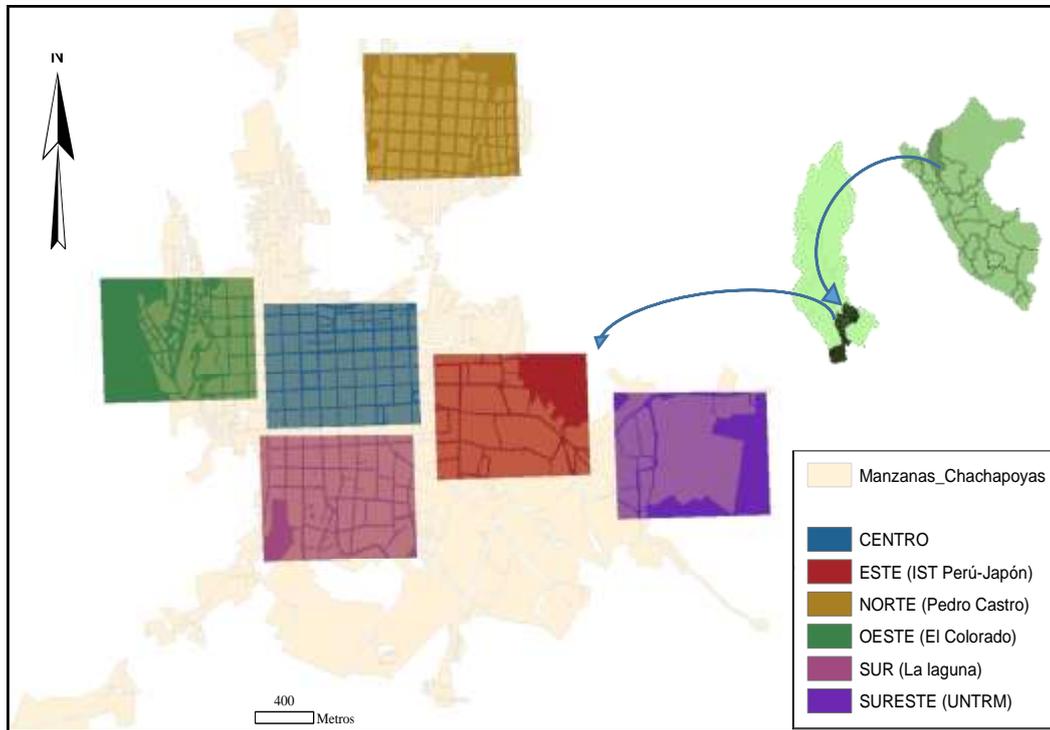


Figura 2. Ubicación de los sectores para el estudio.

Selección de puntos de muestreo

Se realizó un recorrido y observación de la población de forofitos en la ciudad, para identificar las especies de forofitos que se encuentran más distribuidas por la zona de estudio y sean aptos para el desarrollo del IPAM (Asta, Erhardt, Ferretti, y Fornasier, 2002).

Se seleccionaron los árboles con similares características de la corteza que se encuentren dentro de la zona urbana, los árboles cuyos troncos reciban radiación directa por al menos una parte del día, con troncos de al menos 40 cm de perímetro e idealmente sobre 70 cm de perímetro (13 cm y 22 cm de diámetro de altura de pecho, respectivamente), con tamaños similares. No se eligieron árboles visiblemente dañados cuyas cortezas han sido arrancadas o donde sus líquenes hayan sido afectados por diferentes actividades de la población, así como también árboles inclinados que

excedan los 10° desde la vertical, o árboles de plantaciones frutales afectados por fungicidas. Se procedió a seleccionar seis forofitos por sector, realizando una equivalencia a la metodología usada por Lijteroff *et al.*, (2009).

Reconocimiento de especies y recolección de datos

Acevedo, (2004) indica que para el análisis de la diversidad y frecuencia liquénica se deben observar cuatro cuadrículas independientes, cada una compuesta por cinco cuadrados de 10 x 10 cm (Figura 3), estas se apoyarán verticalmente al tronco, de tal forma que el límite inferior quede al menos a 1 m por sobre el suelo.

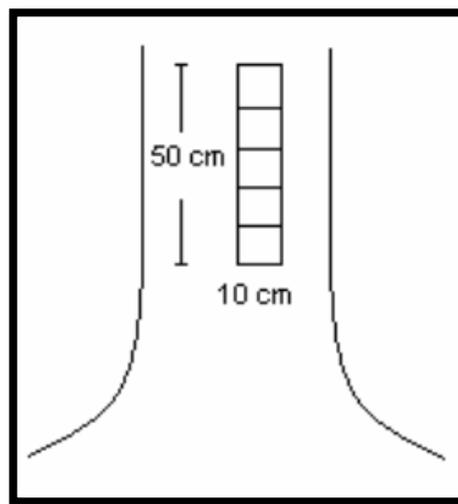


Figura 3. Ubicación de la grilla para cuantificación de los líquenes.

Las cuatro cuadrículas se ubicaron según los cuatro puntos cardinales, y solo podrán desviarse de estos en 20° en sentido horario (para esquivar ramas o heridas). Aunque exista una gran cobertura liquénica, se deberán evitar las siguientes situaciones:

- Partes dañadas o descortezadas.
- Nudos.
- Canalículos.
- Partes con cobertura de briofitas superior al 25%.

En un formulario previamente elaborado se registraron las especies de líquenes presentes en cada cuadrícula, así como la frecuencia de ocurrencia de cada especie en los cinco cuadrados de ella.

Se usaron cuchillas quirúrgicas, cuchillos y pinzas; una vez colectados, los especímenes fueron introducidos en bolsas de papel para evitar la putrefacción y finalmente, fueron transportados en cajas de cartón al laboratorio para su identificación.

Se consideraron a todas las muestras de especies recolectadas como adecuadas para el cálculo del índice de diversidad. Además, se tomaron las siguientes consideraciones:

- No remover alguna especie que se encuentre con problemas de conservación.
- No remover líquenes dentro del espacio ocupado por la cuadrícula, debido a que se planea otro análisis en el futuro.

Identificación

Para la identificación de los líquenes colectados, se determinó el tipo de talo usando un estereomicroscopio. También se empleó claves dicotómicas estandarizadas de acceso libre disponible en <http://www.bgbm.fu-berlin.de/sipman/keys/>, y se contó con la ayuda de un especialista.

Índice de Pureza Atmosférica modificado

La calidad del aire en cada sector se analizó utilizando los líquenes epífitos mediante el Índice de Pureza Atmosférica (IPA), propuesto por Le Blanc y De Sloover (1970) y modificado por Rubiano, (1988) , que toma en cuenta la frecuencia, cobertura, el número de forofitos por estación y el factor de resistencia de cada especie.

El IPA modificado se calculó con base en las siguientes fórmulas:

$$Q_i = \sum_j^n \frac{A_j}{E_j}$$

Donde:

Q_i: Factor de resistencia de la especie i

A_j: Número de especies presentes en cada estación donde se encuentre

E_j: Número de estaciones donde se halle i

Luego:

$$IPA_j = \sum_j^n \frac{(Q_i \times F_i)}{n} \times C_i$$

Donde:

Ci: Cobertura relativa de la especie i en la estación j (estación= forofito)

Fi: Frecuencia de la especie i (número de forofitos de la estación j en que aparece la especie i)

n: Número de forofitos censados en la estación j.

Mapas de isocontaminación

Con el uso del Sistema de Información Geográfica y los resultados del cálculo del $IPAM$ se generaron dichos mapas.

Se asume que la determinación de áreas homogéneas en cuanto al comportamiento de las comunidades liquénicas corresponde a áreas similares por niveles de contaminación (Rubiano, 1988). Con el objeto de definir estas áreas se agruparon los $IPAM$ registrados, en clases de acuerdo con la dispersión y/o la similitud de los datos. Las clases y sus correspondientes niveles de contaminación se determinaron así:

Tabla 1. Zonas de contaminación

	Valor del $IPAM$	Descripción	Zona de contaminación
Por forofitos	0- 3,38	Contaminación máxima	zona 1
	3,38- 5,98	Contaminación aguda	zona 2
	5,98- 8,59	Contaminación media	zona 3
	8,59- 11,20	Contaminación moderada	zona 4
	11,20- 13,81	Zona de transición	Zona 5
	13,81-	Sin contaminación	zona 6
Por sectores	0- 27,79	Contaminación máxima	zona I
	27,79- 31,91	Contaminación media	zona II
	31,91- 36,02	Contaminación moderada	zona III
	36,02-	Sin contaminación	zona IV

Método de interpolación Kriging

Esri, (2017) explica que el Kriging presupone que la distancia o la dirección entre los puntos de muestra reflejan una correlación espacial que puede utilizarse para explicar la variación en la superficie. Kriging ajusta una función matemática a una cantidad especificada de puntos o a todos los puntos dentro de un radio específico para determinar el valor de salida para cada ubicación. Kriging es un proceso que tiene varios pasos, entre los que se incluyen, el análisis estadístico exploratorio de los datos, el modelado de variogramas, la creación de la superficie y la exploración de la superficie de varianza. Este método es más adecuado cuando se sabe que hay una influencia direccional o de la distancia correlacionada espacialmente en los datos.

La fórmula general para Kriging se forma como una suma ponderada de los datos:

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(s_i)$$

Donde:

$Z(s_i)$ = el valor medido en la ubicación i

λ_i = una ponderación desconocida para el valor medido en la ubicación i

s_0 = la ubicación de la predicción

N = la cantidad de valores medidos

Con este interpolador se pueden usar diferentes modelos matemáticos (esférico, circular, exponencial, Gaussiana o lineal) para obtener el resultado final, pero en esta ocasión se usó el modelo lineal, según la metodología usada por Ribeiro *et al.*, (2016).

Método de Kicke para medir pH

Se retiró del árbol con un bisturí la corteza lo más delgada posible. Para obtener resultados comparables, la misma cantidad de material de muestreo, en este caso se tomó 0,5 g. El grosor de las piezas de corteza de la muestra es importante para todas las estimaciones y las muestras deben ser lo más delgadas posible para medir solo la capa de corteza más externa que tiene la asociación más cercana con la vegetación epífita. Se colocó la corteza en 50 ml de KCl 0,25 M. Se dejó incubar 1 hora a 80 ° C

en una estufa, se enfrió hasta los 20°C y se midió los valores de pH usando un pHmetro analítico (Kricke, 2002).

4.6 Análisis de datos

Índice de Diversidad Shannon-Wiener (H')

Este índice se aplicó para las especies de líquenes encontrados, el que en ecosistemas naturales varía entre 0 y no tiene límite superior. Si $H'=0$, solamente cuando hay una sola especie en la muestra y H' es máxima cuando las especies están representadas por el mismo número de individuos. Y viene dado por Moreno, (2001):

$$H' = - \sum_{i=1}^n p_i \ln_2 p_i$$

Donde:

p_i = Abundancia relativa o cobertura de la especie i . Para este estudio p_i fue igual al área que ocupó cada especie en la gradilla de muestreo n =número total de especies o riqueza de la localidad del muestreo

De esta forma el índice contempla la cantidad de especies presentes en el área de estudio (riqueza de especies), y la cantidad relativa de individuos de cada una de esas especies (abundancia).

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

El tamaño de la muestra es menor que 50, por lo que se puede contrastar la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk. Para efectuarla se calcula la media y la varianza muestral, y se ordenan las observaciones de menor a mayor. Luego se calculan las diferencias entre: el primero y el último; el segundo y el penúltimo; el tercero y el antepenúltimo, etc. y se corrigen con unos coeficientes tabulados por Shapiro y Wilk. El estadístico de prueba es:

$$W = \frac{D^2}{nS^2}$$

Donde:

D es la suma de las diferencias corregidas.

S^2 Varianza muestral

Se afirma que los datos no son normales si el estadístico W es menor que 5% a un 95% de significancia.

Correlación de Spearman

Este coeficiente, es una medida de la correlación (la asociación o interdependencia) entre dos variables. Para calcular ρ , los datos son ordenados y reemplazados por su respectivo orden.

El estadístico ρ viene dado por la expresión:

$$\rho = 1 - \frac{6\sum D^2}{N(N^2 - 1)}$$

Donde:

D =Diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de $x - y$. N = Es el número de parejas.

El coeficiente de Spearman oscila entre -1 y +1, indicándonos asociaciones negativas o positivas respectivamente, 0 cero, significa no correlación pero no independencia. Se correlacionaron todas las variables (Niveles de confianza entre 99% y 95%).

Estadístico de Kruskal-Wallis (p)

Esta prueba permite decidir si es que hay muestras independientes que proceden de la misma población o de poblaciones idénticas con la misma mediana. El único supuesto necesario es que las distribuciones subyacentes de las variables sean continuas y que éstas hayan sido medidas por lo menos en una escala ordinal.

H_0 : No hay diferencias entre las variables medidas

Regla de decisión: Si $p \leq 0,05$ se rechaza H_0

Análisis de componentes principales (PCA)

El análisis de componentes principales es una técnica de reducción de la dimensión, porque permite pasar de una gran cantidad de variables interrelacionadas a unas pocas

componentes principales. El método consiste en buscar combinaciones lineales de las variables originales que representen lo mejor posible a la variabilidad presente en los datos. Así, con unas pocas combinaciones lineales, que serán las componentes principales, será suficiente para entender la información contenida en los datos. Al mismo tiempo, la forma en que se construyen las componentes, y su relación con unas u otras variables originales, sirven para entender la estructura de correlación inherente a los datos.

La medición de la humedad y temperatura se realizó en dos forofitos por sector, elegidos al azar, en un periodo de ocho horas durante el día. Y los datos fueron recogidos en el período de octubre a diciembre de 2017.

Estas pruebas estadísticas se realizaron en el programa SPSS v.24.

V. RESULTADOS

Datos de los forofitos y sus variables ambientales

Tabla 2. Especies de forofitos y sus variables ambientales

Sector	Forofito	Coordenadas		Nombre común	Nombre Científico	pH	Humedad H%	Temperatura_ tura °C
		UTM						
		Este	Norte					
	C1	183886	9310138	Fresno	<i>Fraxinus excelsior</i>	6,57		
	C2	184397	9310397	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	7,01		
C	C3	184057	9309960	Pajuro	<i>Erythrina edulis</i>	6,86		
	C4	184197	9310435	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	4,73	66,50	19,55
	C5	183994	9310309	Pajuro	<i>Erythrina edulis</i>	6,72		
	C6	183854	9310274	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	4,84		
	E1	182375	9309843	Molle	<i>Schinus molle</i>	6,78		
	E2	182514	9309911	Lúcuma	<i>Pouteria lucuma</i>	6,20		
	E3	182667	9309987	Naranja	<i>Citrus x sinensis</i>	6,18		
E	E4	181938	9310205	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	6,33	56,25	22,33
	E5	182111	9310286	Nogal	<i>Juglans regia neotrópica</i>	7,26		
	E6	182180	9310069	Capulí	<i>Prunus serotina</i>	6,25		
	N1	181547	9310753	Pino	<i>Pinus patula</i>	7,39		
	N2	181584	9310608	Cedro	<i>Cedrela odorata</i>	6,31		
N	N3	181586	9310600	Pajuro	<i>Erythrina edulis</i>	6,49		
	N4	181697	9310900	Álamo	<i>Salix humboldtiana</i>	6,98	66,25	20,33
	N5	181715	9310787	Nogal	<i>Juglans regia neotrópica</i>	6,87		
	N6	181686	9310881	Palta	<i>Persea americana</i>	7,70		

Sector	Forofito	Coordenadas		Nombre común	Nombre Científico	pH	Humedad H%	Temperatura °C
		UTM						
		Este	Norte					
	O1	182704	9311780	Huaba	<i>Inga edulis</i>	5,89		
	O2	182829	9311692	Lúcuma	<i>Pouteria lucuma</i>	6,32		
	O3	182657	9311620	Palta	<i>Persea americana</i>	7,26		
O	O4	182612	9311682	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	6,37	67,50	20,65
	O5	182494	9311597	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	6,49		
	O6	182995	9311615	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	6,70		
	S1	183131	9310530	Capulí	<i>Prunus serotina</i>	6,50		
	S2	183105	9310505	Balsa	<i>Ochroma pyramidale</i>	6,15		
S	S3	183199	9310319	Molle	<i>Schinus molle</i>	6,80	64,25	21,63
	S4	183013	9310693	Molle	<i>Schinus molle</i>	6,42		
	S5	182875	9310119	Caucho	<i>Hevea brasiliensis</i>	6,08		
	S6	182829	9310570	Nogal	<i>Juglans regia neotrópica</i>	6,66		
	SE1	181985	9310952	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	4,79		
	SE2	181929	9310552	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	4,54		
	SE3	182114	9310955	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	4,95	67,00	19,03
SE	SE4	182698	9310914	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	5,74		
	SE5	182510	9310958	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	6,03		
	SE6	182492	9310358	Eucalipto	<i>Eucalyptus globulus</i>	5,99		
TOTAL					36	$\bar{x} =$ 6,58	$\bar{x} =$ 64,62	$\bar{x} =$ 20,59

\bar{x} =promedio

Se muestrearon 36 forofitos de 15 especies arbóreas diferentes entre árboles frutales y maderables, cada uno fue caracterizado según su pH de corteza, se midió la humedad y la temperatura ambiental. El forofito más muestreado fue *Eucalyptus globulus* (Eucalipto) con un total de 13 veces. La humedad osciló entre los 56-65 % y la temperatura de 19-22°C. El pH más bajo pertenece al *E. globulus* (4.54), el valor más alto a *Persea americana* (7,70).

Composición de las especies de líquenes

Tabla 3. Líquenes cortícolas de la ciudad de Chachapoyas

Especie	Abundancia	Abundancia Relativa	Frecuencia	Frecuencia Relativa
<i>Acarospora nodulosa</i>	758	5,45	3	3,23
<i>Arthonia microcarpa</i>	469	3,37	5	5,38
<i>Arthopyrenia excellens</i>	386	2,77	6	6,45
<i>Buellia aethalea</i>	2795	20,09	6	6,45
<i>Candelaria concolor</i>	3126	22,47	6	6,45
<i>Cladia aggregata</i>	137	0,98	4	4,30
<i>Cladonia perforata</i>	26	0,19	3	3,23
<i>Cladoniicola irregularis</i>	71	0,51	1	1,08
<i>Coccocarpia palmicola</i>	375	2,70	4	4,30
<i>Collema sp1</i>	710	5,10	6	6,45
<i>Collema sp2</i>	388	2,79	6	6,45
<i>Collema fuscovirens</i>	13	0,09	1	1,08
<i>Evernia prunastri</i>	112	0,80	5	5,38
<i>Flavoparmelia caperata</i>	2975	21,38	6	6,45
<i>Lecidea versicolor</i>	385	2,77	5	5,38
<i>Leptogium phyllocarpum</i>	2	0,01	1	1,08
<i>Myriotrema glaucophaenum</i>	71	0,51	1	1,08
<i>Myriotrema squamuloides</i>	324	2,33	2	2,15
<i>Parmelia caperata</i>	114	0,82	1	1,08
<i>Parmotrema latissimum</i>	15	0,11	2	2,15
<i>Psoroma hypnorum</i>	45	0,32	2	2,15
<i>Rimelia reticulata</i>	80	0,57	3	3,23
<i>Roccella caribaea</i>	32	0,23	2	2,15
<i>Sticta canariensis</i>	40	0,29	4	4,30
<i>Teloschistes exilis</i>	143	1,03	4	4,30
<i>Teloschistes flavicans</i>	37	0,27	1	1,08
<i>Xanthoria polycarpa</i>	285	2,05	3	3,23
Total	13914	100	93	100

La especie de líquen más abundante y frecuente fue *Candelaria concolor* con un total de 3126 individuos encontrándose en todos los sectores, luego están *Flavoparmelia caperata* y *Buellia aethalea* con 2975 y 2795 individuos respectivamente; las especies con menos apariciones son *Parmotrema latissimum* con 15, *Collema fuscovirens* con 13 y *Leptogium*

phyllocarpum con 2. A diferencia de *Parmotrema latissimum* que aparece en dos, *Collema fuscovirens* y *Leptogium phyllocarpum*, solo aparecen en un sector.

IPAM

Tabla 4. Valores del IPAM, su clasificación por forofito y por sectores

Forofito	IPAM por forofito	Zona de calidad de aire por forofito	IPAM por sector	Zona de calidad de aire por sector		
C1	7,07	3				
C2	4,64	2				
C3	1,86	1	23,68	I		
C4	0,85	1				
C5	8,49	3				
C6	0,77	1				
E1	3,10	1				
E2	3,01	1				
E3	1,24	1	38,43	IV		
E4	6,15	3				
E5	9,14	4				
E6	2,46	1				
N1	6,14	3				
N2	3,31	1				
N3	11,16	4	25,10	I		
N4	7,50	3				
N5	4,85	2				
N6	1,94	1				
O1	4,29	2				
O2	1,23	1				
O3	1,52	1	34,89	III		
O4	3,02	1				
O5	11,34	5				
O6	4,62	2				
S1	7,23	3				
S2	2,24	1				
S3	2,27	1	32,63	II		
S4	16,42	6				
S5	7,92	3				
S6	2,35	1				
SE1	9,32	4				
SE2	6,59	3				
SE3	1,05	1	26,02	I		
SE4	8,84	4				
SE5	2,02	1				
SE6	4,80	2				

Se clasificó de la siguiente manera: IPAM por forofitos; Contaminación máxima (zona

1), Contaminación aguda (zona 2), Contaminación media (zona 3), Contaminación moderada (zona 4), Zona de transición (Zona 5) y Sin contaminación (zona 6).

Por sector: Contaminación máxima (zona I), Contaminación media (zona II), Contaminación moderada (zona III) y sin contaminación (zona IV).

El valor más alto del IPAM por forofito (16,42) se encontró en el sector sur, en el *Schinus molle* (molle), este valor pertenece a la zona 6 (Sin contaminación), mientras que el valor más bajo de IPAM (0,76) por forofito se presentó en el sector centro, el árbol muestreado fue el *Eucalyptus globulus* (Eucalipto) con pH de corteza 4,84, el que pertenece a la zona 1 (contaminación máxima).

Diversidad (H)

Tabla 5. Diversidad de Shannon Wiener (H) por sectores de líquenes

Sector	Promedio	Mínimo	Máximo
C	1,93	1,89	1,96
E	1,88	1,84	1,93
N	2,25	2,22	2,28
O	2,17	2,13	2,21
S	1,89	1,84	1,94
SE	1,82	1,77	1,86
TOTAL	2,32	2,30	2,34

Todos los sectores tienen una diversidad baja con promedio de 2,32 y el sector norte es más diverso y el sureste el menos diverso

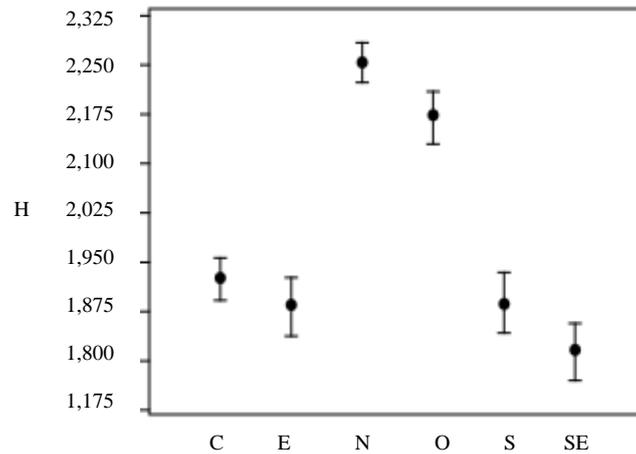


Figura 4. Distribución de la diversidad de líquenes por sectores.

Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk

Tabla 6. Normalidad de las variables

Variable	w
pH	0,014
Humedad	0,000
Temperatura	0,003
IPAM	0,004
Diversidad	0,516

Todas las variables medidas no presentan normalidad (aunque la diversidad es débilmente normal), debido a esto las demás pruebas fueron hechas para datos no paramétricos.

Correlación de Spearman (ρ)

Spearman de la diversidad de especies de líquenes y las variables ambientales: pH de la corteza del forofito, la temperatura ambiental en °C, la humedad relativa H% y la especie del forofito es baja.

Tabla 7. Correlación de Spearman entre todas las variables por forofitos

	Diversidad	pH	Humedad	Temperatura	IPAM	Sector	Forofito
Diversidad	1,000	-0,079	-0,111	-0,011	0,577**	0,103	0,054
pH	-0,079	1,000	-0,213	0,288	0,012	-0,370*	0,526**
Humedad	-0,111	-0,213	1,000	-0,657**	-0,070	0,314	-0,052

** La correlación es significativa al 0,01

* La correlación es significativa al 0,05

El IPAM está directamente correlacionado con la diversidad, el pH dependerá del forofito que estemos analizando, la temperatura y la humedad presentan una correlación invertida, las demás correlaciones son bajas.

Estadístico de Kruskal-Wallis (p)

Tabla 8. Prueba de Kruskal-Wallis para ver diferencias significativas entre las variables por forofitos

	Diversidad	pH	Humedad	Temperatura	IPAM
Significancia (p)	0,511	0,064	0,098	0,100	0,683

No existen diferencias significativas entre las variables por forofito.

Tabla 9. Prueba de diferencias significativas entre las variables por sectores

	Diversidad	pH	Humedad	Temperatura	IPAM
Significancia (p)	0,579	0,014	0,000	0,000	0,785

A excepción del IPAM todas las variables por sectores se comportan significativamente diferentes.

Análisis de componentes principales (ACP)

Tabla 10. Extracción de componentes principales

	1	2	3
Temperatura	0,948		
Humedad	-0,875		0,399
IPAM		0,843	
Diversidad		0,839	
pH	0,535		0,831

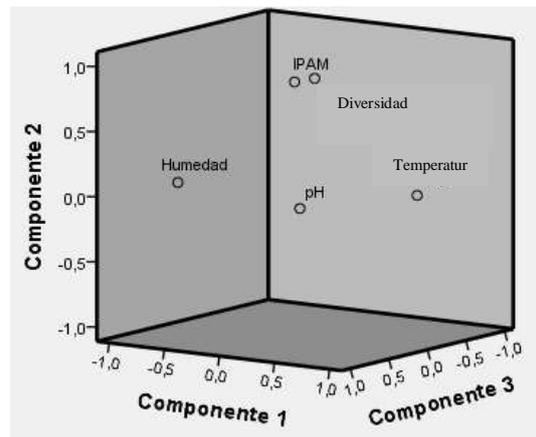


Figura 5. Componentes principales

Hay tres componentes principales, la primera componente esta explicada por Temperatura, Humedad y pH, la segunda componente esta explicada por el IPA y la diversidad; y la tercera componente esta explicada por la Humedad y el pH. Por tanto las variables ambientales se agrupan en un lado y las variables biológicas se agrupan por otro lado, como lo muestra la Figura 5.

Mapas de isocontaminación

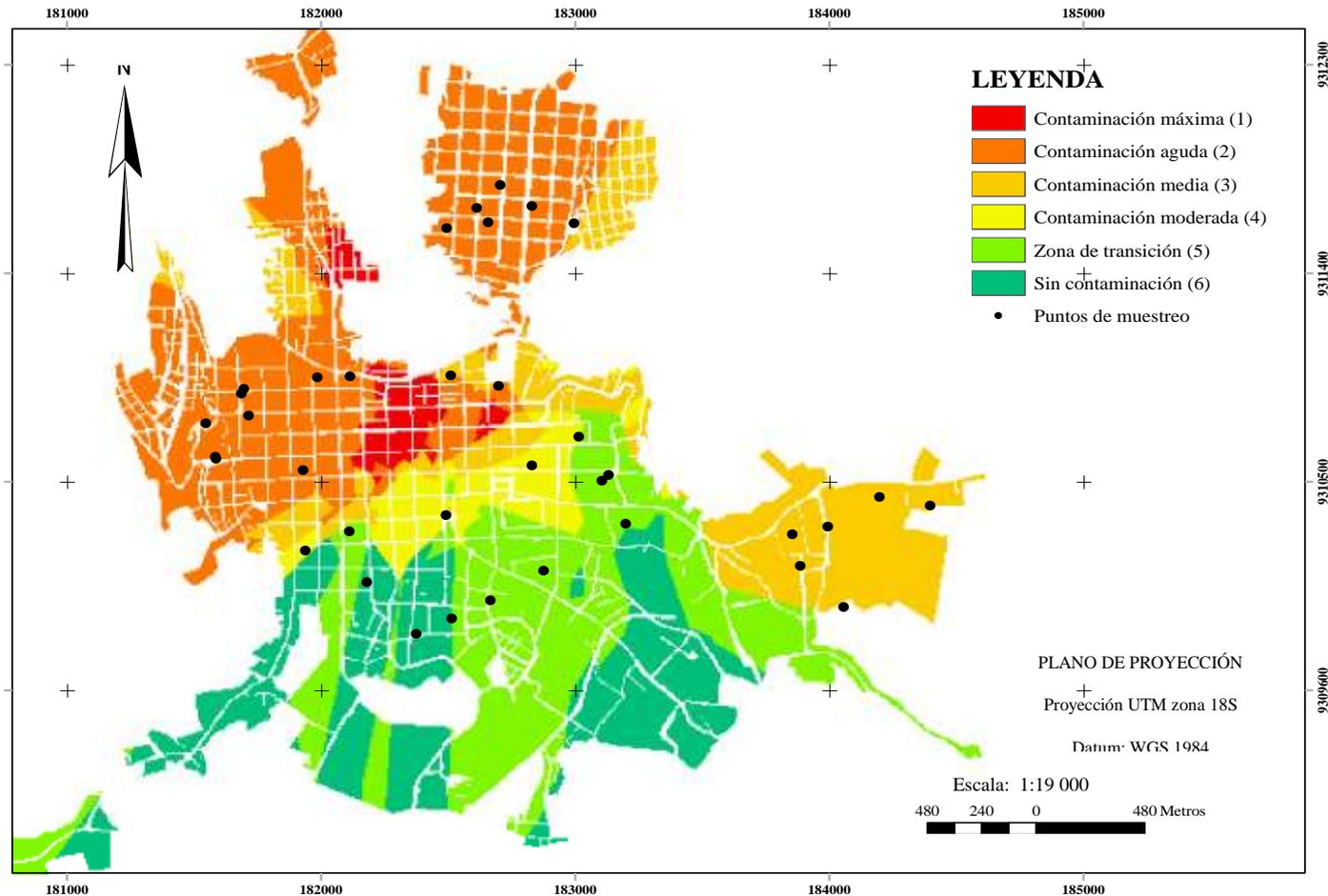


Figura 6. Mapa de isocontaminación por forofitos

Con los datos del $IPAM$ obtenidos por forofito se extrapola por todo el casco urbano. La parte centro presenta los valores máximos de contaminación seguido por la parte norte, la parte sur tiene buena calidad de aire, el este y oeste son de mediana calidad.

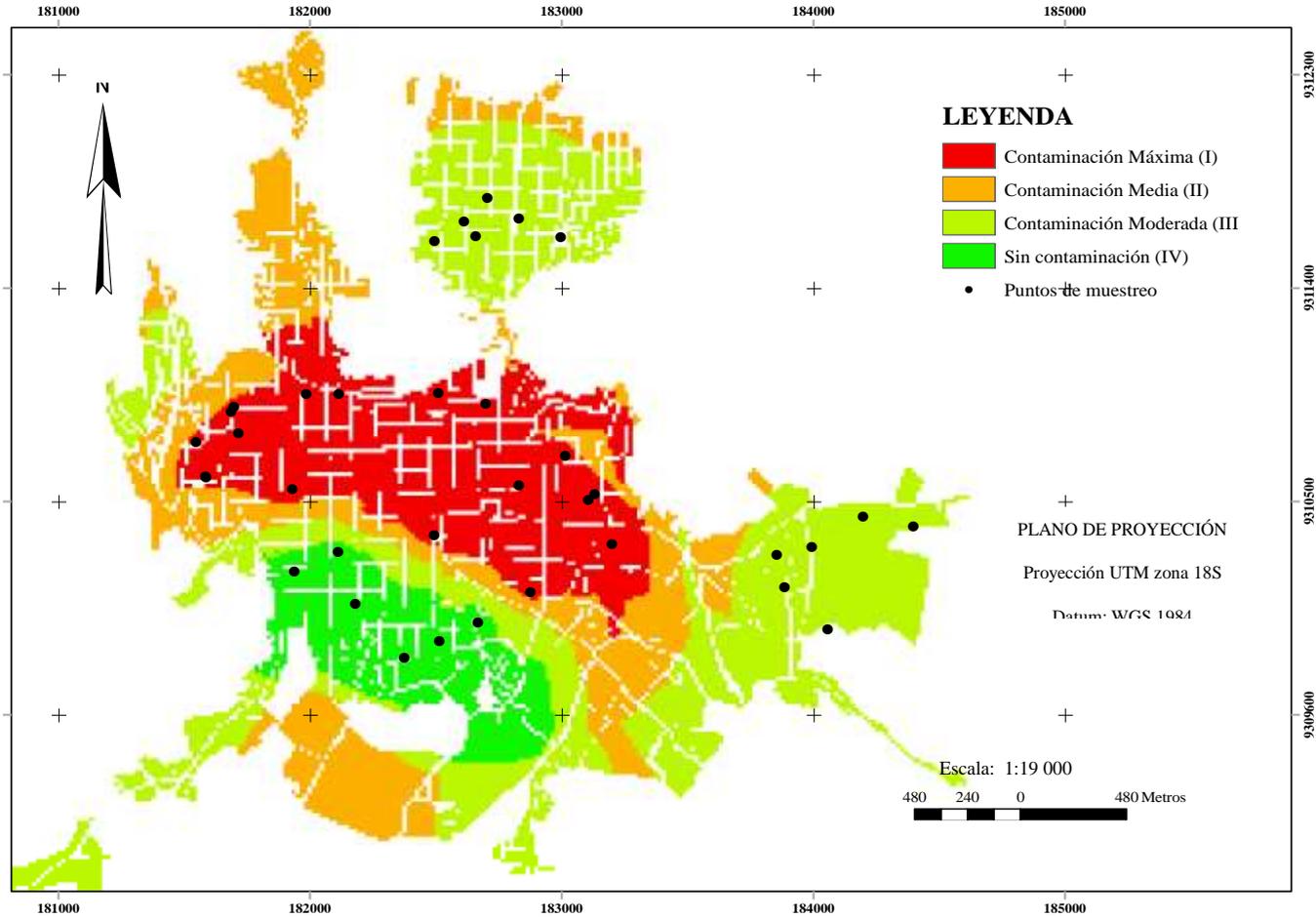


Figura 7. Mapa de isocontaminación por sectores.

Con los datos del $IPAM$ obtenidos por sectores se extrapoló a todo el casco urbano. La contaminación máxima abarca todo el centro de la ciudad y parte del sector sur este, solo el sector sur presenta partes sin contaminación, el norte se encuentra mayoritariamente en una zona de contaminación moderada.

VI. DISCUSIÓN

Todos los datos fueron sometidos a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, y resultaron no seguir la normalidad por lo que se procedió a realizar pruebas estadísticas no paramétricas.

En la ciudad de Chachapoyas la foresta no es uniforme y debido a la poca cantidad de áreas verdes se seleccionaron árboles que cumplieran con los requisitos mínimos para el estudio con el IPAM, en otro estudio se ha visto que la especie de forofito influye en el valor del IPAM (Matos *et al.*, 2017), por lo se evaluó cuánto influye esta variable en la diversidad de líquenes con la prueba de Spearman ($\rho=0,054$), la que indicó una insignificante relación directamente proporcional, entonces la especie de forofito no es una variable determinante como lo mencionaba Kaffer *et al.*, (2011). Sobre la diversidad, una de las variables más influyentes es el pH de la corteza del forofito (Agnan *et al.*, 2017), por lo que se midió el pH de todos los forofitos muestreados para luego correlacionarlo con la diversidad de líquenes que está directamente relacionada con el valor del IPAM ; encontramos con la prueba de Spearman que ésta correlación es muy débil ($\rho=-0,079$).

La temperatura y la humedad también fueron mencionadas como variables relevantes para los valores de diversidad (Batke, Murphy, Hill, y Kelly, 2015; Giordani, 2007) (la correlación encontrada fue de $\rho=0,002$ y $\rho=-0,096$ respectivamente), en este caso no se encontró así, esto se asume es porque los sistemas evaluados fueron distintos, ya que ese estudio se dio en un bosque natural., éstos datos pueden diferir si se realizan mediciones más prolongadas. Se encontró que si cambiamos de forofito el pH del mismo variará pero esta relación no influye en la diversidad ni el IPAM. Pero mientras más húmedo sea el ambiente de un forofito menos temperatura tendrá, las diferencias sectoriales de todos los valores de las variables fueron insignificantes, por lo que el estudio es válido y la selección de forofitos ha sido correcta según la prueba de Kruskal-wallis que presentó valores no significantes.

Podríamos resumir el estudio de calidad de aire en Chachapoyas con tres componentes principales; la primera con la temperatura, humedad y pH, la segunda con los valores del IPAM y la diversidad y la última con variables de Humedad y pH. Se observa que la tendencia de agrupación de las componentes es por un lado las variables ambientales (pH , Humedad y Temperatura) y por otro las variables biológicas (Diversidad y IPAM).

Gonzales *et al.*, (2016); Méndez y Campos, (2015) mencionaron al SO₂ como el principal responsable de que el índice de diversidad de Shannon- Wiener sea bajo por lo que se afirma que es éste el principal contaminante en Chachapoyas, además en el estudio de monitoreo de calidad de aire del (MINAM, 2014) también encontraron concentraciones de este contaminante por encima de los límites. *Flavoparmelia caperata* y *Buellia aethalea* fueron los líquenes más frecuentes, por lo tanto son especies resistentes a la contaminación (Gonzales *et al.*, 2016), las especies de liquen menos encontrados, fueron *Parmotrema latissimum*, *Collema fuscovirens* y *Leptogium phyllocarpum*, éstas especies son las idóneas para indicación al ser altamente sensibles a la contaminación, la última tiene mayor aptitud (Simijaca *et al.*, 2014).

Aunque el sector norte es el más diverso (H=2,25) pertenece a la zona I de isocontaminación, pero el sector sureste presentó el valor más bajo de diversidad (H= 1,82) y también se encuentra en la zona I, se observa que el IPA_M no solo toma en cuenta la diversidad sino también otras variables por lo que es un índice vigente pero con miras a mejorar (Kaffer *et al.*, 2011; Zilio *et al.*, 2017), estos valores se deben interpretar teniendo en cuenta que se incluye el factor de resistencia de los líquenes a la contaminación, entonces no necesariamente el sector más diverso tendrá mejores resultados de IPA_M (Rubiano, 1988).

La interpolación con el método de Kriging es válido para predecir la calidad del aire en lugares donde no se midieron dentro de un área de estudio como lo mencionaba Ribeiro *et al.*, (2016), en este caso se observó que el sector centro el más contaminado y el sector sur tiene partes que no presenta contaminación, la actividad comercial y de transporte junto con la falta de áreas verdes del sector centro reduce la calidad del aire, en los demás sectores las calles no pavimentadas hacen que el polvo sea constante, lo que hace que el material particulado de 2,5 (MP_{2,5}) esté por encima de los límites (MINAM, 2014) y esta es la principal razón de la disminución de la calidad del aire, y menor valor del IPA_M (Gonzales *et al.*, 2016).

VII. CONCLUSIONES

- El empleo de líquenes como indicadores permitió evaluar la calidad del aire en Chachapoyas.
- En promedio la ciudad de Chachapoyas está contaminada según el Índice de Pureza Atmosférica Modificado (IPAM).
- Se encontraron 27 especies de líquenes en la ciudad de Chachapoyas.
- Los líquenes urbanos de Chachapoyas y sus forofitos son buenos indicadores de la calidad del aire, a pesar que la foresta no es uniforme.
- En sistemas urbanos las variables como la especie y el pH de la corteza del forofito, la humedad y la temperatura ambiental no son determinantes para la diversidad de líquenes.
- El mapa de isocontaminación muestra las áreas de igual calidad del aire de la ciudad.
- En todos los sectores la diversidad de Shannon-Wiener de líquenes es baja, es decir, menor que tres.
- La correlación entre el IPAM y las variables como la especie y el pH de la corteza del forofito, la humedad y la temperatura ambiental es insignificante, solo es significativo con la variable diversidad.

VIII. RECOMENDACIONES

- Prolongar el tiempo de toma de muestras de variables ambientales como la humedad y la temperatura.
- Tomar este estudio como una herramienta para el monitoreo de la calidad del aire en Chachapoyas.
- Para contribuir a la mejora de la calidad del aire en el sector centro se deberían implementar plantaciones verticales en medida de lo posible, y considerar el paseo peatonal como posible albergue de plantaciones arbustivas.
- Realizar mediciones con instrumentos y comparar con los resultados aquí mostrados
- Llevar el estudio de caracterización de especies de líquenes a nivel molecular, para asegurar que la identificación es correcta.
- Realizar estudio de identificación y cuantificación de concentración de sustancias contenidas en los líquenes.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acevedo. (2004). Evaluación del uso de líquenes como indicadores biológicos de contaminación atmosférica en la quebrada de la plata, región metropolitana, 1-33.
- Agnan, Probst, y Séjalon. (2017). Evaluation of lichen species resistance to atmospheric metal pollution by coupling diversity and bioaccumulation approaches: A new bioindication scale for French forested areas. *Ecological Indicators*, 72, 99-110. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.08.006>
- Ashmore. (2013). *Encyclopedia of Biodiversity*.
- Asta, Erhardt, Ferretti, y Fornasier. (2002). Mapping lichen diversity as an indicator of environmental quality. *Environment*, 7(1-3), 273-279. <https://doi.org/Article>
- Bajpai, Upreti, Nayaka, y Kumari. (2010). Biodiversity, bioaccumulation and physiological changes in lichens growing in the vicinity of coal-based thermal power plant of Raebareli district, north India. *Journal of Hazardous Materials*, 174(1-3), 429-436. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.071>
- Ballester, Llop, Querol, y Esplugues. (2014). Evolución de los riesgos ambientales en el contexto de la crisis económica. Informe SESPAS 2014. *Gaceta Sanitaria*. SESPAS. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2014.03.004>
- Barreno. (2009). Glosario líquenes. Recuperado a partir de https://www.keytonature.eu/wiki/Glosario_-_Líquenes
- Barreno, y Pérez. (2003). Biología de los líquenes. *Líquenes de la Reserva Natural Integral de Muniellos, Asturias*, 65-82.
- Batke, Murphy, Hill, y Kelly. (2015). Can air humidity and temperature regimes within cloud forest canopies be predicted from bryophyte and lichen cover? *Ecological Indicators*, 56, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.022>
- Bustamante, Monge, y Méndez. (2013). Use of a Geographic Information System and lichens to map air pollution in a tropical city: San José, Costa Rica. *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol)*, 61(2), 557-563.
- Caicedo, G., Valle, D., Chacón, G., Maldonado, H., Roschman-González, y Trompiz, E. (2013). Biomonitorio activo de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el aire del valle de

- caracas-venezuela empleando el liquen Parmotrema sancti-angelii (Lyngé) Hale. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29(4), 261-267.
- Carrera, y Carreras. (2011). Efectos de la aplicación de glifosato sobre parámetros químico-fisiológicos en usnea amblyoclada (Müll. arg.) zahlbr. *Ecologia Austral*, 21(3), 353-361.
- Chaparro, y Aguirre. (2002). Hongos liquenizados. En *Hongos liquenizados* (pp. 85-89). Bogotá. Recuperado a partir de [https://books.google.com.pe/books?id=dzEVJL3DuZ8Cypg=PA87yIpg=PA87yDq=mecanismos+de+reproducción+de+los+líquenes+source=blyots=AC0oRhH3Pqysig=bkPl-M8a1jfxUyupXbUM2NUkJcYyhl=esysa=Xyved=0ahUKEwiPp5TX2NbVAhXFOyYKHV7hCTQQ6AEIPzAE#v=onepageyq=mecanismos de re](https://books.google.com.pe/books?id=dzEVJL3DuZ8Cypg=PA87yIpg=PA87yDq=mecanismos+de+reproducción+de+los+líquenes+source=blyots=AC0oRhH3Pqysig=bkPl-M8a1jfxUyupXbUM2NUkJcYyhl=esysa=Xyved=0ahUKEwiPp5TX2NbVAhXFOyYKHV7hCTQQ6AEIPzAE#v=onepageyq=mecanismos+de+re)
- Chávez, Lücking, Sipman, y Umaña. (2009). INBIO. Recuperado a partir de <http://www.inbio.ac.cr/papers/liquenes/que-es-liquen.html>
- Cortes, Cardona, Segura, y Garzón. (2016). Factores físicos y mentales asociados con la capacidad funcional del adulto mayor, Departamento de Antioquia, 2012. *Revista de Salud Pública*, 18(2), 165-178. <https://doi.org/10.15446/rsap.v18n2.47209>
- ECURED. (2008). ECURED. Recuperado a partir de https://www.ecured.cu/Contaminación_del_aire
- Esri, A. (2017). ArcGIS Desktop. Recuperado a partir de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-kriging-works.htm>
- Estévez, Montero, López, Pupo, Torres, Oraina, ... Wolterbeek. (2011). Biomonitorio de la contaminación atmosférica en La Habana durante la campaña 2004-2005. *Nucleus*, 50, 18-23.
- Estrabou, Stiefkens, Hadid, Rodríguez, y Pérez. (2004). Effects of air pollutants on morphology and reproduction in four lichen species in Córdoba, Argentina Efectos de contaminación del aire sobre la morfología y reproducción en cuatro especies de líquenes. *Ecologia en Bolivia*, 39(2), 33-45.
- Fernandez, Molero, y Merzouki. (2010). Monitoring plant diversity and climatic change in Sierra Nevada (Spain). *Acta Botanica Gallica*, 157(4), 669-676. <https://doi.org/10.1080/12538078.2010.10516240>

- Gatica, Pereira, y Vallejos. (2011). Líquenes epífitos: una herramienta para estudiar la continuidad ecológica en Isla Mocha, Chile. *Gayana. Botánica*, 68(2), 226-235. <https://doi.org/10.4067/S0717-66432011000200014>
- Giordani. (2007). Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution*, 146(2), 317-323. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.030>
- Gómez, Fernández, Benzo, Galarraga, Hernández, y Roschman. (2013). Líquenes como biomonitores de la contaminación atmosférica por hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) - Revisión. *Revista de la Facultad de Ingeniería*, 28(1), 45-58.
- Gonzales. (2013). biologia.laguaia. Recuperado a partir de <http://biologia.laguaia2000.com/microbiologia/protistas/morfologia-de-los-liquenes>
- Gonzales, Luján, Navarro, y Flores. (2016). Aplicabilidad de líquenes bioindicadores como herramienta de monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba. *Acta Nova*, 7(4), 455-482.
- Gonzalez, Lingua, y Gudiño. (2012). Evaluación de la calidad atmosférica sobre una sección de la cuenca del río Suquia, (Córdoba, Argentina) mediante el empleo del biomonitor *Usnea amblyoclada*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(4), 311-322. Recuperado a partir de <http://ojs.unam.mx/index.php/rica/article/view/26379>
- Hawksworth, Iturriaga, y Crespo. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22(2), 71-82. [https://doi.org/10.1016/S1130-1406\(05\)70013-9](https://doi.org/10.1016/S1130-1406(05)70013-9)
- Heslop, y Green. (1988). Recent Levels of Radionuclides in Lichens from Southwest Poland with Particular Reference, 7, 123-129.
- Itatí. (2007). Líquenes. Recuperado a partir de <http://www.biologia.edu.ar/fungi/liquenes.htm>
- Kaffer, Azevedo, Alves, Camejo, Fachel, Maria, y Vargas. (2011). Corticolous lichens as environmental indicators in urban areas in southern Brazil, 11, 1319-1332. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.006>
- Kricke. (2002). Measuring bark pH. En *Monitoring with Lichens* (pp. 333-336). Recuperado a partir de <https://vdocuments.site/monitoring-with-lichens-monitoring-lichens-.html>
- LeBlanc, y Sloover. (1970). Relation between industrialization and the distribution and growth

- of epiphytic lichens and mosses in Montreal. *Canadian Journal of Botany*, 48(8), 1485-1496. <https://doi.org/10.1139/b70-224>
- Lijteroff, Lima, y Prieri. (2009). Uso de líquenes como bioindicadores de contaminación atmosférica en la ciudad de San Luis, Argentina. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 25(2), 111-120.
- Manning, y Tiedemann. (1995). Climate change: Potential effects of increased atmospheric Carbon dioxide, ozone, and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environmental Pollution*, 88(2), 219-245. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)91446-R](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)91446-R)
- Matos, Geiser, Hardman, Glavich, Pinho, Nunes, Soares y Branquinho. (2017). Tracking global change using lichen diversity: towards a global-scale ecological indicator. *Methods in Ecology and Evolution*, 8(7), 788-798. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12712>
- Méndez, y Campos. (2015). Cobertura de líquenes arborícolas y su relación con la orientación cardinal en parques municipales de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, 7(2), 313-317.
- MINAM. (2014). Monitoreo de la calidad del aire. Recuperado a partir de sial.munichachapoyas.gob.pe/tematica/monitoreo-calidad-aire
- MINAM. (2017). DECRETO SUPREMO N° 003-2017-MINAM. Recuperado a partir de <http://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2017-minam/>
- Montilla. (2014). Ecosistema Tierra. Recuperado a partir de <http://ecosistematierra.blogspot.pe/2014/10/bioindicadores.html>
- Moreno. (2001). Métodos para medir la biodiversidad. *MyT - Manuales y Tesis SEA*, 1, 84. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0103709>
- Nash. (2008). *Lichen Biology* (second). Arizona. Recuperado a partir de <http://lib.du.ac.ir/documents/10157/60227/lichen+Biology.pdf>
- Nimis, y Purvis. (2000). Monitoring lichens as indicators of pollution. En *Monitoring with lichens* (pp. 7-10).
- Nimis, Wolsele, y Scheidegger. (2000). Monitoring with lichens. En *Monitoring with lichens*. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7>

- Puig. (2013). cricyt. Recuperado a partir de: <http://www.cricyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/Bioindic.htm>
- Purvis, Chimonides, Din, Erotokritou, Jeffries, Jones, ... Spiro. (2003). Which factors are responsible for the changing lichen floras of London? *Science of the Total Environment*, 310(1-3), 179-189. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00638-1](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00638-1)
- Ramírez, y Cano. (2005). Líquenes de Pueblo Libre, una localidad andina en la Cordillera Negra (Huaylas, Ancash, Perú). *Revista Peruana de Biología*, 12(3), 383-396. Recuperado a partir de file:///scielo.php?script=sci_arttextypid=S1727-99332005000300007ylang=pt
- Ribeiro, Pinho, Branquinho, Llop, y Pereira. (2016). Geostatistical uncertainty of assessing air quality using high-spatial-resolution lichen data: A health study in the urban area of Sines, Portugal. *Science of the Total Environment*, 562, 740-750. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.081>
- Romero, Olite, y Álvarez. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene Epidemiológica*, 44(2), 15. Recuperado a partir de <http://www.redalyc.org/pdf/2232/223214848008.pdf>
- Rubiano. (1988). Líquenes como indicadores de contaminación en el complejo industrial de Betania y la termoeléctrica de Zipaquirá, Cundinamarca. *Acta Biológica Colombiana*, 1(4), 95-125.
- Rubiano, y Chaparro. (2006). Delimitación De Áreas De Isocontaminación Atmosférica En El Campus De La Universidad Nacional De Colombia Mediante El Análisis De Bioindicadores (Líquenes Epifitos). *Acta Biologica Colombiana*, 11(1970), 82-102.
- Simijaca, Morales, y Vargas. (2014). Use of Non Vascular Plant Organisms as Indicators of Urban Air Pollution (Tunja, Boyacá, Colombiano). *Acta Biológica Colombiana*, 19(2), 221. <https://doi.org/10.15446/abc.v19n2.40681>
- Spark. (2016). Weather Spark. Recuperado a partir de <https://es.weatherspark.com/y/20597/Clima-promedio-en-Chachapoyas-Perú-durante-todo-el-año>
- Tiempo. (2016). Banco Mundial revela que la contaminación atmosférica causa una de cada 10 muertes.
- Will-Wolf, Jovan, y Amacher. (2017). Lichen elemental content bioindicators for air quality in

upper Midwest, USA: A model for large-scale monitoring. *Ecological Indicators*, 78, 253-263. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.03.017>

Zilio, Hammond, y Castro. (2017). Levantamiento planimétrico y análisis liquenométrico en el sitio campo de Chenques, Costa Norte De Santa Cruz (Patagonia Argentina). *Chungará (Arica)*, 49(ahead), 0-0. <https://doi.org/10.4067/S0717-73562017005000007>

ANEXOS

ANEXO 1. Formulario de recolección de datos en campo

Lugar y fecha:										Lugar y fecha:													
Datum:										Datum:													
EM:		Frecuencia					% de cubierta					EM:		Frecuencia					% de cubierta				
Coord.s GPS	SP	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	Coord.s GPS	SP	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	1												1										
Huso:	2											Huso:	2										
altura(msnm)	3											altura(msnm)	3										
AT	4											AT	4										
Coord. GPS	5											Coord. GPS	5										
	6												6										
	7												7										
Huso:	8											Huso:	8										
	9												9										
Obs:										Obs:													

Lugar y fecha:										Lugar y fecha:													
Datum:										Datum:													
EM:		Frecuencia					% de cubierta					EM:		Frecuencia					% de cubierta				
Coord.s GPS	SP	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	Coord.s GPS	SP	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
	1												1										
Huso:	2											Huso:	2										
altura(msnm)	3											altura(msnm)	3										
AT	4											AT	4										
Coord. GPS	5											Coord. GPS	5										
	6												6										
	7												7										
Huso:	8											Huso:	8										
	9												9										
Obs:										Obs:													

ANEXO 2. Especies de líquenes de Chachapoyas

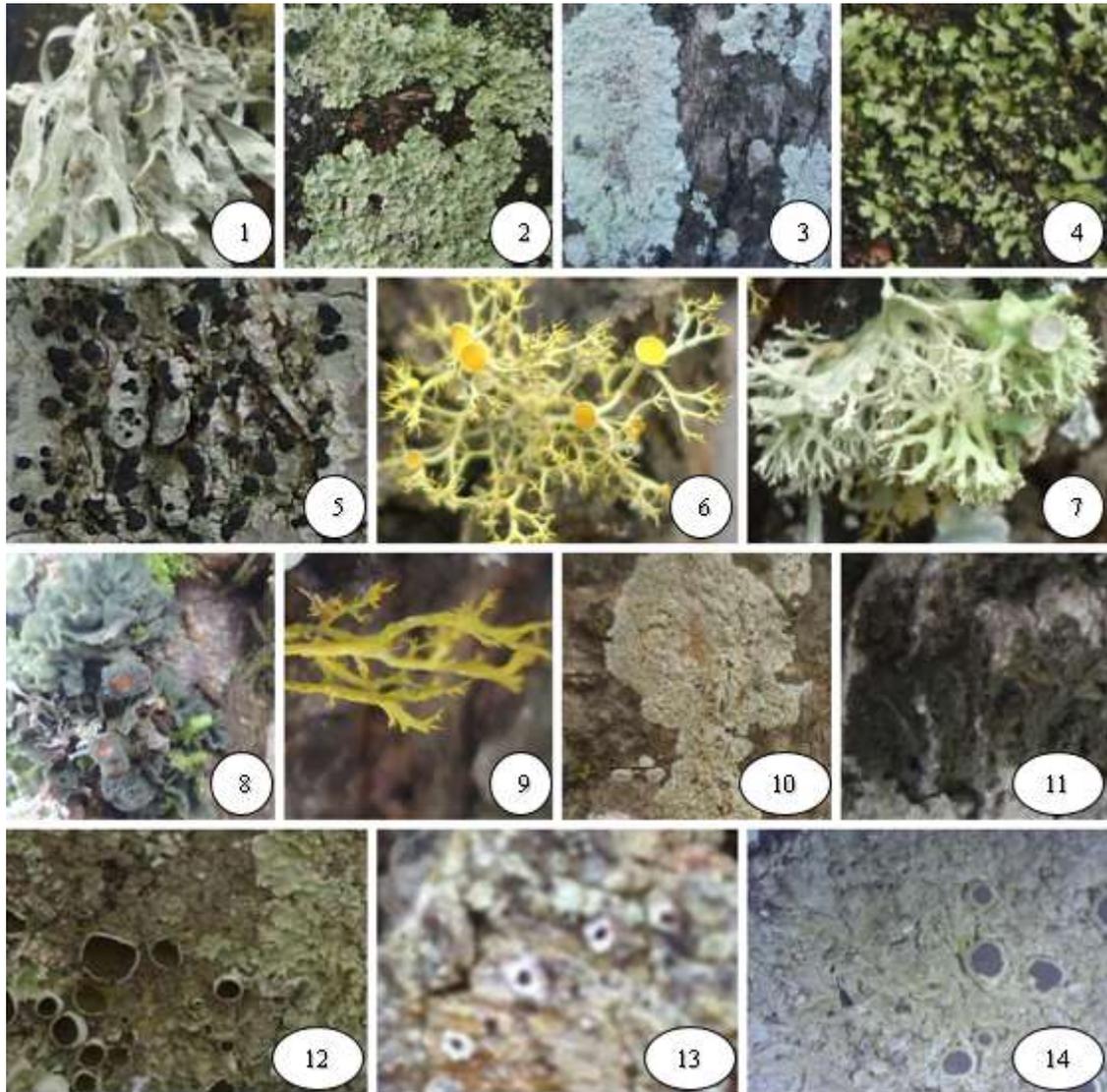


Figura 8a. Especies de líquenes en Chachapoyas(a).

1. *Rocella caribaea*. 2. *Flavoparmelia caperata*. 3. *Buellia aethalea*. 4. *Rimelia reticulata*
5. *Arthonia microcarpa*. 6. *Teloschistes exilis*. 7. *Cladonia perforata*. 8. *Leptogium phyllocarpum*. 9. *Teloschistes flavicans*. 10. *Myriotrema squamuloides*. 11. *Collema fuscovirens*. 12. *Collema Sp 2*. 13. *Myriotrema glaucophaenum*. 14. *Acarospora nodulosa*

ANEXO 3. Especies de líquenes de Chachapoyas

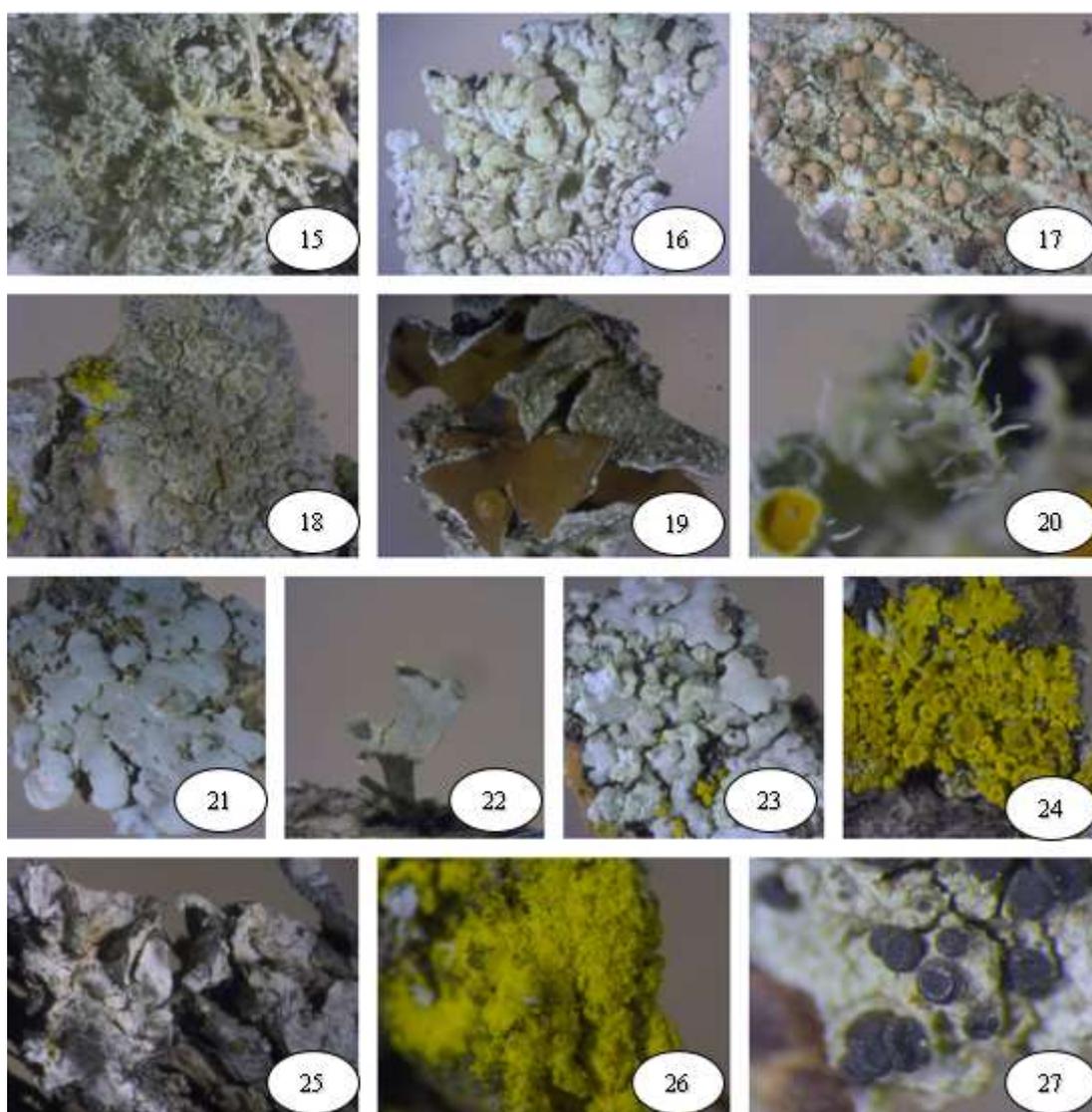


Figura 8b. Especies de líquenes en Chachapoyas (b).

15. *Cladia aggregata*. 16. *Cladoniicola irregularis*. 17. *Lecidea versicolor*. 18. *Collema sp1*. 19. *Parmotrema latissimum*. 20. *Psoroma hypnorum*. 21. *Coccocarpia palmicola*. 22. *Evernia prunastri*. 23. *Parmelia caperata*. 24. *Xanthoria polycarpa*. 25. *Sticta canariensis*. 26. *Candelaria concolor*. 27. *Arthopyrenia excellens*.

ANEXO 3. Frecuencia de líquenes por sector

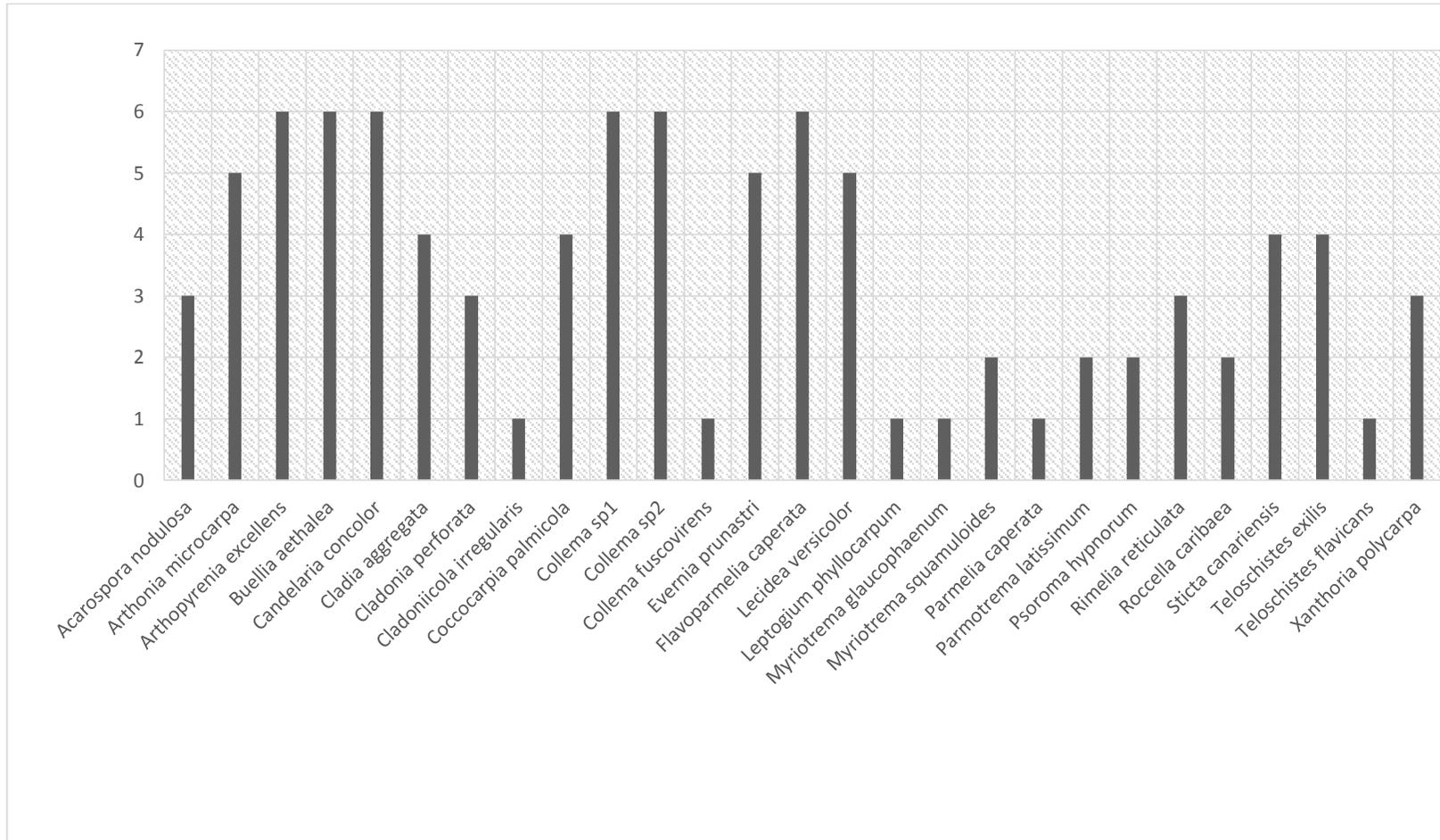


Figura 9. Frecuencia de las especies de líquenes por sector