

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO



## FACULTAD DE INGENIERÍA

### CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Proyecto de Investigación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

#### TRABAJO DE TITULACIÓN

DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO ASOCIADO A LOS AGREGADOS DEL  
SUELO DEL PÁRAMO Y CULTIVO EN LA PARROQUIA ACHUPALLAS.

Autores:

Bonifás Toapanta Ibeth del Pilar  
Yupa Chimborazo Marco Vinicio

Tutor: PhD. Omaira Márquez

Riobamba - Ecuador  
2019

## CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL

Los miembros del Tribunal de Graduación del proyecto de investigación de título:  
**DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO ASOCIADO A LOS AGREGADOS DEL SUELO DEL PÁRAMO Y CULTIVO EN LA PARROQUIA ACHUPALLAS**,  
presentado por: Ibeth del Pilar Bonifás Toapanta y Marco Vinicio Yupa Chimborazo

Dirigido por: PhD. Omaira Márquez

Una vez escuchada la defensa oral y revisado el informe final del proyecto de investigación con fines de graduación escrito en el cual se ha constatado el cumplimiento de las observaciones realizadas, remite la presente para uso y custodia en la biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Para constancia de lo expuesto firman:

PhD. Omaira Márquez

Tutora del Proyecto

Ing. Patricio Santillán

Miembro del Tribunal

Ing. Gabriel Moreno

Miembro del Tribunal



Firma



Firma

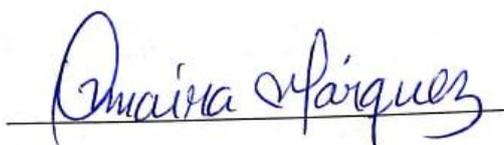


Firma

## DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA

Por la presente, certifico que el actual trabajo de investigación previo a la obtención del título de INGENIERO AMBIENTAL, elaborado por los señores: Ibeth del Pilar Bonifás Toapanta y Marco Vinicio Yupa Chimborazo, con el tema: “DINÁMICA DEL CARBONO ORGÁNICO ASOCIADO A LOS AGREGADOS DEL SUELO DEL PÁRAMO Y CULTIVO EN LA PARROQUIA ACHUPALLAS”, el mismo que fue analizado y supervisado bajo mi asesoramiento permanente en calidad de Tutora y Guía, por lo que se encuentra apto para ser presentado y defendido.

Es todo lo que se puede informar en honor a la verdad.



PhD. Omaira Márquez.

CI. 175724411-4

## AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, IBETH DEL PILAR BONIFAS TOAPANTA con cédula de identidad No. 1804620704 y MARCO VINICIO YUPA CHIMBORAZO, con cédula de identidad No. 0350117842, somos responsables de las ideas, doctrinas, resultados y propuesta realizada en la presente investigación y el patrimonio intelectual de la misma a la Universidad Nacional de Chimborazo.



---

Ibeth del Pilar Bonifás Toapanta

CI. 1804620704



---

Marco Vinicio Yupa Chimborazo

CI. 0350117842

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecemos a Dios por sus planes para nuestra vida, por bendecirnos siempre, brindarnos la fortaleza necesaria en tiempos de dificultad y compartir aquellos momentos de alegría.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, por abrirnos las puertas y hacer nuestro sueño realidad, formarnos como profesionales comprometidos con el bien común, propendiendo a generar cambios importantes en la sociedad.

A la Dra. Omaira Márquez, el Ing. Marco Rodríguez y a todo el equipo del Departamento de Investigación, por guiarnos y con sus conocimientos enriquecer los nuestros durante el desarrollo del trabajo investigativo y aún más, por ser unos profesionales de ejemplo.

**Ibeth Bonifás**

**Marco Yupa**

## DEDICATORIA

A mis abuelitos (Gaspar y María), por ir más allá de cumplir su papel de abuelos, por ser unos padres amorosos y amables.

A mis padres (Bolívar y Olga), porque aun cuando mi padre ya no está, me quedan sus palabras en el corazón y amor profundo. Pues no solo me motivaron para ser una profesional, sino una mejor persona, a no rendirme porque todo era posible si realmente lo quería.

A mis hermanos (David, Sofy y Aracely), porque jamás me dejaron sola, por ser mis cómplices y mis mejores amigos, porque me enseñaron a ser feliz.

A mis tíos (José, Digna, Hernán y Rosa), porque fueron fortaleza en tiempos difíciles y compartieron con alegría los aciertos de mi vida.

A Christian Aguilar, por ser fuente de inspiración, de cariño y un ejemplo a seguir, por convertirse en mi apoyo incondicional y mejorar mi vida.

A mis amigos y docentes, porque de distintas formas me motivaron a continuar a pesar de los obstáculos.

**Ibeth Bonifás**

Dedico este trabajo a mis padres, por ser fuente de inspiración y ejemplo de esfuerzo, por enseñarme que el mejor conocimiento es aquel que se aprende por sí mismo, a mis hermanos por estar ahí siempre apoyándome a lo largo de esta etapa, a mis demás familiares y amigos por el apoyo y la confianza.

**Marco Yupa**

## LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

DAS	Dinámica de Agregados del Suelo
COS	Carbono Orgánico del Suelo
DA	Densidad Aparente
MO	Materia Orgánica
FAO	Food and Agriculture Organization
LSA	Laboratorio de Servicio Ambientales
UNACH	Universidad Nacional de Chimborazo
ADI	Índice de Agregación-Disrupción
TOC	Carbono Orgánico Total
DI	Índice de Disrupción de Agregados
FIS	Índice de Formación de macroagregados Estables
FIU	Índice de Formación de macroagregados Inestables
DSM	Índice de Desestabilización de macroagregados Estables
SSM	Índice de Estabilización de macroagregados Estables
MG	Macroagregados Grandes
MP	Macroagregados Pequeños
MI	Microagregados
FM	Fracción Mineral
mg	Miligramos
L	Litros

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN DE TRIBUNAL .....	i
DECLARACIÓN EXPRESA DE TUTORÍA .....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
DEDICATORIA .....	v
LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xi
RESUMEN .....	xii
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS .....	3
2.1. Objetivo General .....	3
2.2. Objetivos específicos .....	3
3. ESTADO DEL ARTE RELACIONADO A LA TEMÁTICA .....	4
3.1. Definición de páramo .....	4
3.2. Influencia del cambio de uso de suelo .....	4
3.3. Componentes del suelo .....	5
3.4. Agregados del suelo .....	5
3.5. Carbono .....	6
3.6. Carbono asociado a los agregados del suelo .....	6
3.7. Procesos básicos de la Dinámica de Agregados: .....	7
3.7.1. Disrupción .....	8
3.7.2. Estabilización/desestabilización .....	8
3.7.3. Agregación .....	8
4. METODOLOGÍA .....	9
4.1. Selección y reconocimiento del área de estudio .....	9
4.2. Determinación de las unidades de muestreo .....	9
4.3. Análisis de laboratorio .....	10
4.4. Propiedades fisicoquímicas .....	10
4.4.1. Color .....	10
4.4.2. pH .....	10
4.4.3. Textura .....	11
4.4.4. Humedad y densidad aparente (DA) .....	11
4.5. Determinación del tamaño y estabilidad de los agregados .....	11
4.5.1. Tratamiento seco .....	11
4.5.2. Tratamiento húmedo .....	12

4.5.3.	Tamaño de los agregados .....	12
4.6.	Evaluación de la dinámica de agregados .....	12
4.6.1.	Índice de disrupción de agregados (DI).....	13
4.6.2.	Índice de formación de macroagregados estables e inestables grandes. ....	14
4.6.3.	Índice de desestabilización de macroagregados estables grandes e Índice de estabilización de macroagregados grandes.....	14
4.6.4.	Índice de formación de macroagregados estables e inestables pequeños.....	15
4.6.5.	Índice para la desestabilización de macroagregados pequeños e Índice de estabilización de macroagregados estables pequeños. ....	15
4.6.6.	Índice de agregación-disrupción (ADI).....	16
4.7.	Determinación del contenido de carbono en los agregados.....	17
4.8.	Análisis estadístico .....	17
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	18
5.1.	Características físicas.....	18
5.1.1.	Color .....	18
5.1.2.	pH .....	18
5.1.3.	Textura, densidad aparente y humedad .....	19
5.2.	Distribución de agregados por tamaño y estabilidad .....	21
5.2.1.	Tratamiento en seco .....	21
5.2.2.	Tratamiento en húmedo .....	22
5.2.3.	Distribución de agregados estables e inestables .....	23
5.3.	Índices de estabilidad de macroagregados estables e inestables del suelo de páramo y cultivo .....	25
5.3.1.	Índice de disrupción de agregados (DI).....	25
5.3.2.	Índice de formación de macroagregados estables e inestables grandes. ....	25
5.3.3.	Índice de desestabilización de macroagregados estables grandes e Índice de estabilización de macroagregados grandes.....	26
5.3.4.	Índice de agregación-disrupción (ADI).....	26
5.4.	Dinámica de los agregados del suelo bajo páramo y cultivo. ....	27
5.4.1.	Disrupción .....	27
5.4.2.	Estabilización/ desestabilización .....	29
5.4.3.	Agregación.....	29
5.5.	Dinámica del carbono. (mg C/ kg agg).....	30
5.5.1.	Disrupción .....	30
5.5.2.	Estabilización/desestabilización pasto-cultivo. ....	31
5.5.3.	Agregación.....	32
6.	CONCLUSIONES.....	34
7.	RECOMENDACIONES .....	35

8.	BIBLIOGRAFÍA .....	36
9.	ANEXOS.....	39
9.1.	Densidad aparente, Humedad y pH del suelo bajo páramo, pasto y cultivo.....	39
9.2.	Proporción de agregados estables e inestables en agua en cada fracción de suelo bajo páramo, pasto y cultivo.....	39
9.3.	Fase de campo.....	39
9.3.1.	Identificación de parcelas por conglomerados .....	39
9.3.2.	Recolección de Muestras .....	40
9.4.	Fase de Laboratorio .....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y puntos de muestreo.....	9
Figura 2. Procedimiento de laboratorio usado para determinar la distribución de agregados por estabilidad y tamaño.....	12
Figura 3. Dinámica de agregados en el suelo usando el modelo de los agregados (DAS)..	13
Figura 4. Color del suelo bajo páramo, pasto y cultivo.....	18
Figura 5. pH del suelo bajo páramo, pasto y cultivo .....	19
Figura 6. Densidad aparente del uso de suelo, páramo, pasto y cultivo.....	20
Figura 7. Contenido de humedad del uso de suelo páramo, pasto y cultivo .....	21
Figura 8. Distribución de agregados por tamaño (Tratamiento en seco).....	22
Figura 9. Distribución de agregados del suelo (Tratamiento en húmedo).....	23
Figura 10. Distribución de los agregados estables del uso de suelo.....	24
Figura 11. Distribución de agregados inestables del uso del suelo .....	24
Figura 12. Dinámica de agregados (Pasto) en el suelo usando el modelo DAS. ....	28
Figura 13. Dinámica de agregados (Cultivo) en el suelo usando el modelo DAS .....	28
Figura 14. Dinámica del carbono orgánico asociado a los agregados de suelo (Pasto) .....	31
Figura 15. Dinámica del carbono orgánico asociado a los agregados de suelo (Cultivo)..	32

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Textura del suelo .....	11
Tabla 2. Textura del suelo bajo páramo, pasto y cultivo $p < 0,005$ .....	19
Tabla 3. Indicadores de la dinámica de agregados del suelo (Pasto) .....	25
Tabla 4. Indicadores de la dinámica de agregados del suelo (cultivo) .....	26

## RESUMEN

Los páramos son considerados ecosistemas estratégicos por su oferta de servicios ambientales, entre los que cabe resaltar la acumulación de carbono. Se estudió la dinámica de los agregados en suelos bajo páramo y su afectación debido a cambios en el uso de la tierra. Se usó como estado de referencia el uso del suelo bajo páramo y se comparó con suelos bajo pastizal y bajo cultivo. Se tomaron muestras de los horizontes superficiales para determinar la distribución de los agregados del suelo y la cantidad de carbono orgánico asociado a ellos. Los índices del modelo de la dinámica de agregados del suelo (DAS) permitieron monitorear los procesos de agregación, disrupción y desestabilización debido a los cambios de uso del páramo. La cantidad de macroagregados estables grandes ( $>2000\mu\text{m}$ ) fue mayor en páramo (45,6%), con respecto a pasto (18%), y cultivo (16%). El proceso de disrupción resultó ser el proceso dominante con un valor de índice de agregación - disrupción (ADI) negativo (-0,45) cuando el páramo es remplazado por pasto o cultivo. Los resultados mostraron que suelos bajo páramo tiene mayor concentración de carbono asociado a los agregados (503,1) en comparación con los pastizales (427,1) y cultivo (116,7) mg C/kg agg respectivamente. Se concluye que el páramo es un ecosistema muy vulnerable por el alto impacto antrópico; por lo tanto, se debe propender a su conservación y protección, por cuanto contiene fracciones lábiles de carbono que pueden ser devueltas directamente a la atmósfera y favorecer el cambio climático y el efecto invernadero.

Palabras clave: páramo, Dinámica de Agregados del Suelo (DAS), disrupción, desestabilización, carbono orgánico.

## ABSTRACT

The paramos are considered strategic ecosystems for their offer of environmental services, and carbon accumulation should be highlighted. It studied the dynamics of aggregates in soils under paramo and their affectation due to changes in land use. The use of soil under paramo was used as reference status and compared with soils under pasture and cultivation. Samples of surface horizons were taken to determine the distribution of soil aggregates and the amount of organic carbon associated with them. The model indices of aggregate soil dynamics (ASD) allowed the monitoring of aggregation, disruption, and destabilization processes due to changes in the use of the paramo. The number of stable large macro-aggregates, ( $> 2000\mu\text{m}$ ) was higher in paramo (45,6%), concerning pasture (18%), and cultivation (16%). The disruption process turned out to be the dominant process with an aggregation-disruption index value (ADI) negative (-0.45) when the paramo is replaced by pasture or crop. The results showed that soils under paramo have a higher concentration of carbon associated with the aggregates (503,1) compared with the pastures (427,1) and cultivation (116,7) mg C/kg agg respectively. So the paramo is a very vulnerable ecosystem due to the high anthropic impact; therefore, conservation and protection should be encouraged, as it contains labile carbon fractions that can be returned directly to the atmosphere and favor climate change and the greenhouse effect.

**Keywords:** Aggregate Soil Dynamics (ASD), disruption, stabilization, organic carbon.

  
Reviewed by: Romero Hugo  
Language Skills Teacher



## 1. INTRODUCCIÓN

Los suelos constituyen un recurso valioso, que ofrece el servicio ecosistémico de soporte, a partir del cual se desarrollan los demás servicios. El uso junto al cambio del uso de suelo como resultado del crecimiento demográfico y las grandes presiones que estos generan para la satisfacción de necesidades han sido determinantes en la imposición de un nuevo sistema productivo que permitan una mayor cantidad de productos a través de insumos tóxicos, sin considerar la calidad de los mismo ni la afectación a la salud humana y el ambiente (Lefevre, Rekik, Alcantara, & Wiesel, 2017).

Según Mcknight en el (2015), todas las prácticas agrícolas (cultivos, ganadería y forestación) tienen como consecuencia que la capa de vegetación desaparece durante un determinado período. En el caso de cultivos el suelo es arado antes de la siembra y para la ganadería la quema es una práctica común. La desaparición de la vegetación protectora causa una exposición del suelo al aire y aumenta la evaporación en su superficie lo que tiene un efecto altamente significativo porque los suelos volcánicos poco desarrollados, que se encuentran en la mayoría de los páramos, se secan irreversiblemente y no recuperan su morfología original cuando se vuelven a mojar. Con prácticas agrícolas repetitivas, sin largos períodos de descanso, este ciclo de sequía y disminución de materia orgánica puede ser tan grave que el resultado es un suelo seco, arenoso y sin partes orgánicas (Crespo *et al.*, 2014).

A través de una gestión sostenible del suelo se pueden lograr grandes cambios encaminados a contrarrestar amenazas como: erosión del suelo, pérdida del Carbono Orgánico del Suelo (COS), desequilibrio de nutrientes, acidificación del suelo, anegamiento, compactación y sellado del suelo, salinización y pérdida de la biodiversidad del suelo que generan preocupación para la salud alimentaria (Lefevre *et al.*, 2017).

Considerando la aptitud de los suelos, los páramos son ecosistemas neo tropicales montañosos, tienen elevaciones de aproximadamente 3000 y 4700 msnm (por encima de la línea superior del bosque), cubren una superficie de más de 75000 km<sup>2</sup> y se extienden desde Costa Rica hasta los Andes del norte de Colombia, Ecuador, Venezuela y Perú (Crespo and Cooper, 2013; Hofstede *et al.*, 2014; Mcknight, 2015).

Por tal motivo, Naldini (2016) menciona que la presencia de la materia orgánica en el suelo es muy importante ya que interviene en varios procesos como la infiltración, la erosión y la posibilidad de compactación del mismo. Sin embargo, lo incierto aún es la cantidad de CO<sub>2</sub> que se libera ante la degradación del suelo mediante el cambio de uso o bien la cantidad que los suelos logran captar de este elemento, por eso es necesario un estudio más profundo a través de los agregados del suelo como una unidad básica que se relaciona con la materia orgánica.

En este sentido, el objetivo del presente estudio es evaluar la distribución de agregados por tamaño y su estabilidad; así como su asociación con el carbono orgánico del suelo y la manera en que éstos se han visto afectados debido a los cambios de uso de la tierra de páramo a cultivo o pasto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo General**

- Estudiar la dinámica del carbono orgánico asociado a los agregados del suelo de páramo y su reemplazo por cultivo en la parroquia Achupallas.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar la distribución de agregados por tamaño y estabilidad del suelo bajo páramo y cultivo.
- Evaluar los Índices de estabilidad de macroagregados estables e inestables del suelo de páramo y cultivo.
- Estudiar la dinámica de los agregados del suelo bajo páramo y cultivo.
- Estudiar la dinámica del carbono asociado a los agregados del suelo de páramo y cultivo.

### **3. ESTADO DEL ARTE RELACIONADO A LA TEMÁTICA**

#### **3.1. Definición de páramo**

Los ecosistemas de páramo son muy diversos biológicamente y ofertan varios servicios ecosistémicos. Contienen grandes cantidades de carbono acumulado, influenciado por las bajas temperaturas que reducen las tasas de descomposición de la materia orgánica, este proceso es lento y, a pesar de que los stocks de hojarasca y biomasa aérea son muy bajos, la materia orgánica (MO) se acumula en el suelo y puede alcanzar hasta  $60 \text{ kg C m}^{-2}$ , ubicándose entre los suelos con mayor reserva de carbono en el mundo (Chinchipe, 2014).

Los páramos forman un ecosistema estratégico por la relación que posee con la sociedad. Son el principal regulador del sistema hídrico del país (incluyendo agua potable, agua para riego y agua para generación de electricidad), son de suma importancia ecológica por su biodiversidad especial y brindan espacio para ejercer actividades agrícolas. Este último aspecto forma el nexo por excelencia de la gente con el ecosistema, y es la causa de que el páramo hoy en día contenga una gran diversidad de paisajes que va más allá de su ya notable diversidad natural (Crespo *et al.*, 2014; Hofstede *et al.*, 2014).

#### **3.2. Influencia del cambio de uso de suelo**

Los distintos tipos de páramo están determinados por su naturaleza, como páramos secos, páramos herbáceos, páramos de almohadillas, la intervención humana ha transformado el páramo, en menor o mayor grado, en un mosaico de paisajes, desde el establecimiento de cultivos o pajonales para la alimentación de ganado vacuno hasta la compartición de espacios entre estos y una recuperación de pajonal o bosquetes (Crespo *et al.*, 2014)

Existe una base ecológica sobre la cual se fundamenta el impacto que provoca el cambio de uso en el suelo producto de las actividades antrópicas. Una de las características de los suelos de páramo es que poseen contenidos de ceniza volcánica, los mismos que forman complejos fuertes con la materia orgánica propiciando una inhibición en su descomposición. Además, a esto se suman las bajas temperaturas ( $7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a 3500 m.s.n.m) que decrecen a una tasa promedio de  $0,5$  a  $0,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m (Buytaert, Célleri, De Bievre, & Cisneros, 2014) y la nubosidad que permiten al páramo mantener la humedad. Adicional a esto se encuentra una relación importante entre el agua y la materia orgánica, la primera no admite la

descomposición de esta y la segunda a través de la adsorción permite la retención del agua (Hofstede *et al.*, 2014).

### **3.3. Componentes del suelo**

Respecto a los elementos que componen el suelo, es tal la cantidad existente, que se los ha agrupado de la siguiente manera:

**Materia orgánica:** está compuesta por microorganismos y materia de origen vegetal y animal. Entre los materiales orgánicos, son de especial importancia las bacterias, los hongos, el humus, las lombrices y las hormigas (Pereira, 2015).

**Materia inorgánica:** está compuesta por los minerales formados por la degradación de la roca sobre la cual está el suelo. De los minerales del suelo se pueden citar como ejemplos la arena, el limo y la arcilla (Pereira, 2015).

**Aire:** es muy importante ya que sirve para la respiración de las raíces de las plantas y de los microorganismos que viven en el suelo; más del 20% del volumen total del suelo debe estar ocupado por aire (Pereira, 2015).

**Agua:** es el medio en el cual se disuelven los minerales del suelo, convirtiéndose en sustancias que pueden tomar las plantas a través de las raíces (Pereira, 2015).

### **3.4. Agregados del suelo**

La agregación del suelo es el proceso mediante el cual las partículas primarias (arena, limo y arcilla), se unen formando unidades secundarias (agregados), debido a la acción de fuerzas naturales y a sustancias derivadas de exudados de las raíces y provenientes de la actividad microbiana. Sin embargo, esta organización es dinámica y compleja y no muy bien comprendida (Gabioud, Wilson, & Sasal, 2011).

En suelos en que las partículas están agregadas, el diseño y la perdurabilidad del espacio poroso dependen en gran medida de la forma, tamaño, distribución y estabilidad de los agregados; consecuentemente en estos suelos el movimiento y la disponibilidad de agua y de aire estarán influenciadas por el estado de agregación (Teresa, Ortiz, Alfonso, & Araujo, 2016).

La estabilidad de los agregados del suelo está condicionada principalmente por la acción del agua como factor de degradación y por la cohesión en estado húmedo como factor de resistencia. Así, la estabilidad de agregados del suelo, por ser una característica edáfica

dinámica, es considerada un indicador sensible de tendencias a la recuperación o degradación de los suelos y, se encuentra relacionada con la actividad de los coloides. El contenido orgánico, la actividad microbiana el laboreo del suelo, la secuencia y la frecuencia de cultivos en la rotación (Gabioud *et al.*, 2011).

### **3.5. Carbono**

El papel de los páramos en la provisión y regulación hídrica y en la acumulación de carbono en sus suelos, es necesario entender los delicados procesos que intervienen en el movimiento o flujo del agua y el carbono a través del ecosistema. Los páramos han tenido historias muy diferentes de intervención, por lo que su estado de conservación actualmente varía desde páramos muy bien conservados (aproximadamente un 30%), pasando por páramos transformados (40%) hasta páramos muy degradados (30%). Los suelos que no contienen arcillas alofónicas pueden acumular más carbono orgánico que los suelos alofánicos. Por lo general, los suelos con arcillas alófanicas son mucho más jóvenes que el resto de suelos de páramo, estas condiciones húmedas que favorecen la descomposición de la materia orgánica (Llambí *et al.*, 2012).

En zonas húmedas es posible encontrar valores de carbono orgánicos superiores a 40%, en zonas del norte de Ecuador, en condiciones más secas, el contenido de carbono puede ser de 7 %. Mientras que para suelos del sur de Ecuador el promedio de materia orgánica encontrado para los primeros 30 cm, es de 17,4 % para suelos bajo pajonal y de 52,7 % para suelos de pantanos bajo almohadillas (Llambí *et al.*, 2012).

### **3.6. Carbono asociado a los agregados del suelo**

La materia orgánica humificada del suelo constituye un componente clave que determina la estructura y estabilidad de los agregados, la disponibilidad de nutrientes o la capacidad de retención de agua, siendo generalmente aceptada una proporción de 58% en carbono orgánico (Brogniez *et al.*, 2015)

La elevada variabilidad del contenido en carbono orgánico del suelo, tanto en horizontal como en vertical, se asocia con diversos factores ambientales, entre los cuales, la tipología de cubiertas vegetales y el clima, han sido los más frecuentemente estudiados por distintos autores en diferentes contextos geográficos (Rodríguez *et al.*, 2017).

La interacción entre la materia orgánica y las partículas minerales del suelo es un proceso que ocurre en la mayoría de los horizontes superficiales. Interacciones órgano-minerales no solamente influyen en la dinámica de la materia orgánica si no que contribuyen a la formación y estabilización de los agregados del suelo (Garcia *et al.*, 2010).

La formación de agregados del suelo es el resultado complejo de la interacción entre procesos biológicos, químicos y físicos en el suelo. Los factores que agrupan la estabilidad de agregados en el suelo pueden ser congregados en abióticos (arcillas, sesquióxidos, cationes), bióticos (materia orgánica, actividades de las plantas, fauna del suelo y microorganismos), y del medioambiente (temperatura y humedad del suelo) (Garcia *et al.*, 2010).

La estabilidad estructural con frecuencia es medida como la estabilidad de los fragmentos del suelo que están expuestos a las presiones; además su importancia radica en la capacidad del suelo de mantener su estructura durante la lluvia o el riego. La estructura del suelo se puede colapsar debido a: (i) los impactos de las gotas de lluvia en la superficie del suelo que rompen los agregados causando encostramiento; y (ii) el rompimiento de los agregados del suelo al humedecerse rápidamente, tanto en la superficie (lo cual contribuye al encostramiento) como dentro del suelo (lo cual provoca compactación). En ambos casos, la desintegración de los agregados en pequeñas partículas hace que los poros se tapen y sellen la superficie, lo cual reduce la conductividad hidráulica del suelo (Chocobar *et al.*, 2013).

El uso de índices para calificar la degradación del suelo es valioso, porque éstos aglutinan el efecto de varias propiedades dándole un peso específico a cada una acorde a su funcionamiento en el suelo. Los índices consideran atributos o propiedades que reflejan aspectos de la productividad o funcionalidad ambiental, también son usados para determinar si la calidad del suelo se mantiene estable o está declinando debido a un proceso de degradación (Iniestra, Ramírez, Berenice, Arriaga, & López, 2013).

### **3.7. Procesos básicos de la Dinámica de Agregados:**

Los tres procesos básicos que caracterizan la dinámica de agregados del suelo definidos por (Márquez, García, Schultz & Isenhardt, 2019) son:

### **3.7.1. Disrupción**

Ocurre cuando los macroagregados inestables ( $> 250 \mu\text{m}$ ) se pueden fragmentar durante una perturbación y como resultado sus unidades constituyentes son redistribuidas en fracciones de tamaño más pequeño.

### **3.7.2. Estabilización/desestabilización**

Cuando los macroagregados estables ( $> 250 \mu\text{m}$ ) permanecen en la misma fracción, mientras que el sistema evoluciona del estado de referencia al nuevo estado.

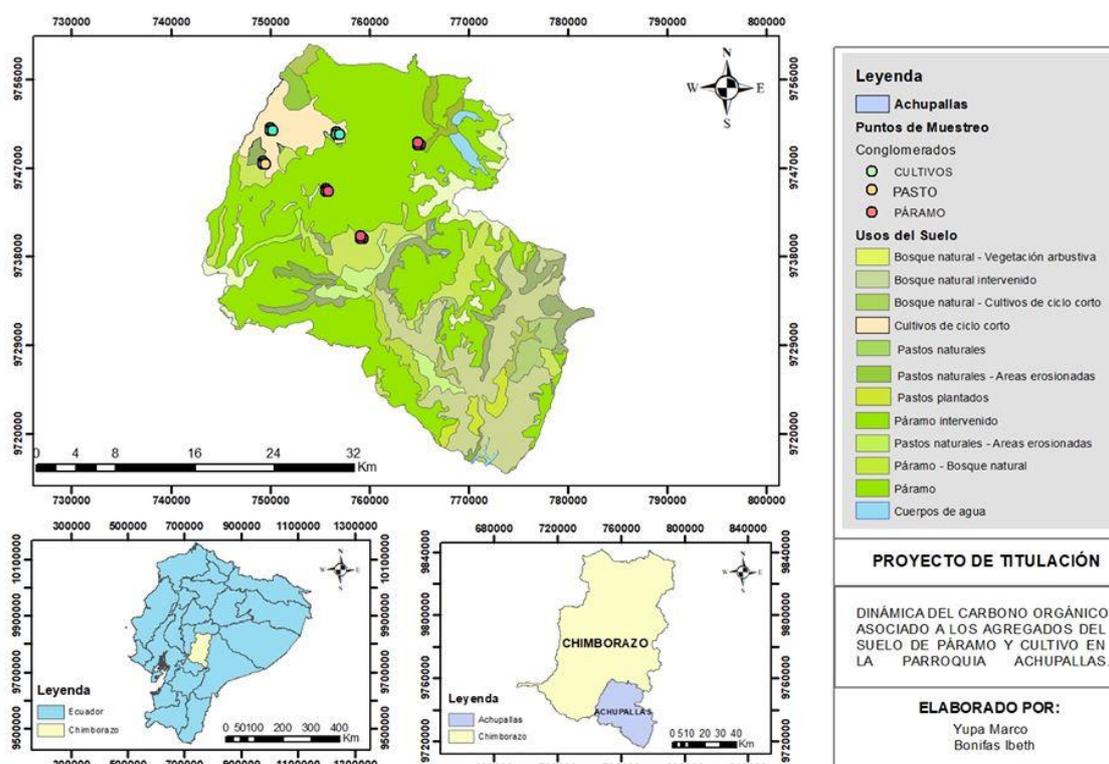
### **3.7.3. Agregación**

Cuando pequeñas unidades de agregados (partículas minerales, microagregados y/o macroagregados pequeños) pueden formar macroagregados grandes. Para evaluar la agregación se utiliza el “flujo-neto” a cada fracción. El flujo-neto representa el flujo neto de agregados incorporándose o desincorporándose de una fracción.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1. Selección y reconocimiento del área de estudio

El presente estudio se llevó a cabo en la parroquia Achupallas (Figura 1), que comprende una extensión de 1012 Km<sup>2</sup> (M Rodríguez & Cargua, 2013), con un rango altitudinal que va desde los 2600 a 4500 m.s.n.m. La temperatura en el sector oscila entre 0 - 17 °C; con una precipitación media de 1077 mm, con rangos de (500 - 1200) mm y una humedad relativa de 83,6% con rangos entre (43,9 - 92,2) (Cargua *et al.*, 2014; Rodríguez, *et. al.*, 2017; Damian *et al.*, 2017).



*Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio y puntos de muestreo.*

### 4.2. Determinación de las unidades de muestreo

Los puntos de muestreo se determinaron a partir del estudio denominado “Aplicación y validación del modelo matemático Kriging, para determinar la relación del stock de carbono edáfico con los sistemas ecológicos, en la parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo”, del cual se tomaron 6 conglomerados, distribuidos de la siguiente manera: 3

del ecosistema páramo, 1 de pasto y 2 de cultivo. Cada conglomerado consta de 3 parcelas distribuidas en forma de L. Para mejorar la eficiencia en las mediciones, la parcela tiene un diseño anidado con parcelas de diferentes dimensiones, según el tamaño de los elementos de la vegetación. La recolección de muestras de suelo se realizó en la sub parcela de 20 x 20 m, donde se establecieron cinco puntos de muestreo, distribuidos uno en el centro y en cada extremo de los cuatro vértices, con el propósito de obtener una muestra compuesta (Cueva *et al.*, 2012).

### **4.3. Análisis de laboratorio**

Cada muestra, previo al secado se pasó por un tamiz de 2 mm para el análisis de las propiedades fisicoquímicas (Color, textura, pH, Densidad aparente, humedad) de acuerdo a la Guía para la descripción de suelos (FAO, 2009). Para la determinación por tamaño y estabilidad de agregados de acuerdo al modelo DAS propuesto por (Garcia *et al.*, 2010; C. O. Márquez, Garcia, Cambardella, Schultz, & Isenhart, 2004) las muestras fueron pasadas a través de un tamiz de 8 mm. Para determinar el contenido de carbono en los agregados del suelo establecidos con el modelo DAS se utilizó el equipo Flash 2000 del laboratorio de servicios ambientales (LSA-UNACH) mediante el método de combustión Dumas (Cargua, Rodríguez, Damián, Recalde, & Santillán, 2017).

### **4.4. Propiedades fisicoquímicas**

#### **4.4.1. Color**

El color de la matriz del suelo de cada uso (Páramo, pasto y cultivo) se registró en condiciones de estado húmedo y seco, usando las notaciones para matiz, valor y croma como se da en la Carta o en Tabla de Colores de Suelo Munsell (FAO, 2009).

#### **4.4.2. pH**

Las mediciones se realizaron con pH metro combinado con cuerpo de epoxy (Thermo Scientific\_9165NWP). La calibración del equipo se realizó con soluciones buffer de pH 7 y 4, acorde a lo indicado por el fabricante. Para esto se pesaron 10 g de suelo y se les agregó 25 mL de agua desionizada. La mezcla suelo: agua se agitó durante 30 minutos y el pH se midió en el sobrenadante sin agitar (Beretta, Bassahum, & Musselli, 2014).

### 4.4.3. Textura

Estimación de las clases texturales a través del contenido de las siguientes partículas:

*Tabla 1. Textura del suelo*

Tamaño de partículas	Descripción
2000 µm	Arena muy gruesa
1250 µm	Arena gruesa
630 µm	Arena media
200 µm	Arena fina
125 µm	Arena muy fina
63 µm	Limo grueso
20 µm	Limo fino
2 µm	Arcilla

*Fuente: (FAO, 2009).*

### 4.4.4. Humedad y densidad aparente (DA)

La densidad aparente se determinó utilizando la metodología aplicada por (Rodríguez & Cargua, 2013) que resulta de la relación entre la muestra seca (24 h a 105 °C) y el volumen del cilindro (Ecuación 1).

$$DA \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Volumen del cilindro}} \quad (1)$$

## 4.5. Determinación del tamaño y estabilidad de los agregados

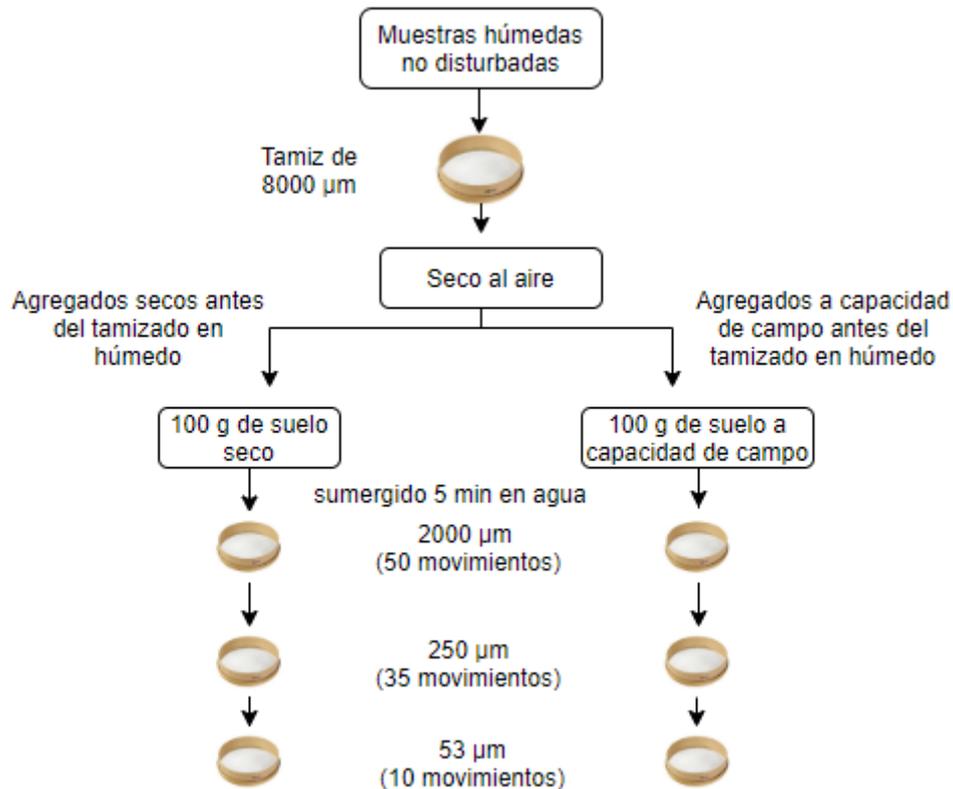
Se realizó siguiendo el procedimiento descrito por (Márquez *et al.*, 2019). Para cada muestra compuesta se tomaron dos submuestras de 100 g c/u, para ser usadas en la determinación de la distribución de agregados por tamaño.

### 4.5.1. Tratamiento seco

Se pesó 100 g de suelo previamente seco al aire y se le aplicó directamente el tamizado en húmedo. Para llevar a cabo este proceso cada muestra se sumergió en 1,3 L de agua por un tiempo de 5 min. Posteriormente se pasó por tres tamices (2 mm, 0,250 mm y 53µm de diámetro) y se le aplicó un número diferente de movimientos (Figura 2). Las fracciones retenidas en cada tamiz, fueron colocadas en bandejas de aluminio y posteriormente llevadas a la estufa a una temperatura de 60 ° C, para su secado y posterior pesaje.

#### 4.5.2. Tratamiento húmedo

Otra muestra de 100 g de suelo se colocó en un recipiente plástico. Se agregó 40 ml de agua hasta llevar a capacidad de campo, asegurándose que el agua se distribuyera uniformemente sobre la muestra garantizando así su humedecimiento total. Luego esta fue puesta en un refrigerador a 4 ° C durante 12 horas, posteriormente se le aplicó el tamizado en húmedo (similar al tratamiento anterior). Cada una de las fracciones obtenidas en el tamiz se colocó en bandejas y aluminio y colocadas en la estufa. (Figura 2).



**Figura 2.** Procedimiento de laboratorio usado para determinar la distribución de agregados por estabilidad y tamaño.

Propuesto por: (Márquez, García, Schultz, & Isenhardt, 2019)

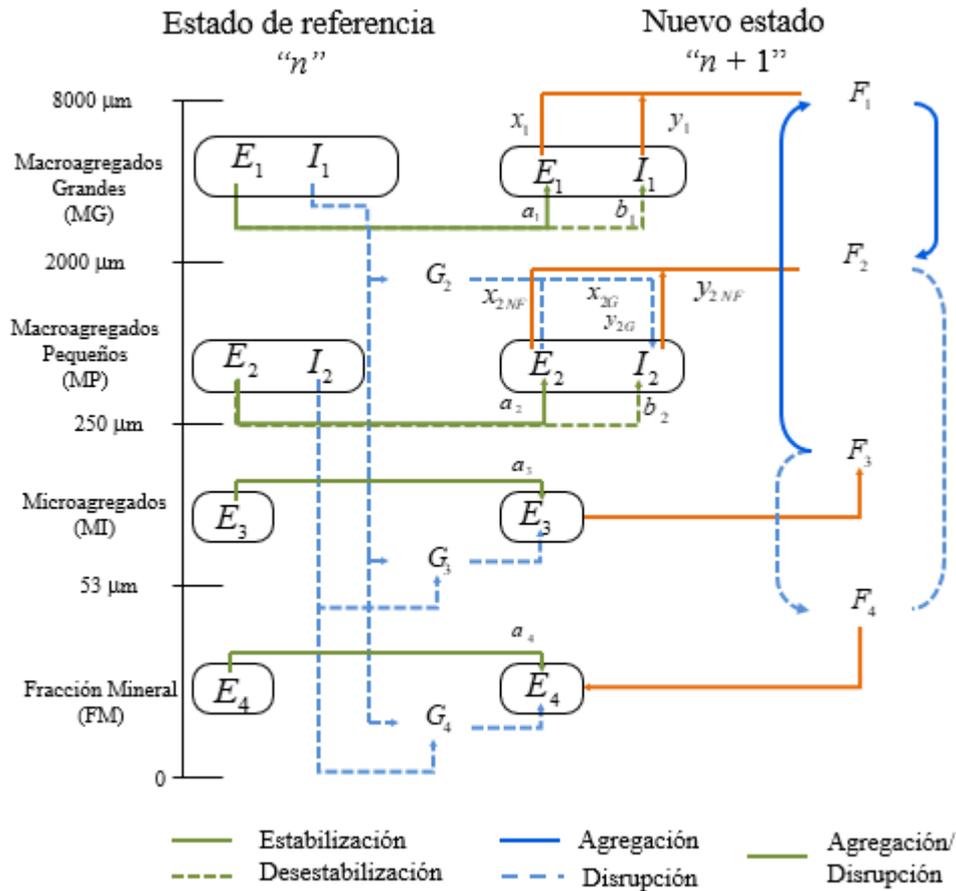
#### 4.5.3. Tamaño de los agregados

Cada una de las fracciones de los agregados fue pesada y agrupada de acuerdo al uso de suelo, conglomerado y parcela. Esta información fue almacenada en una base de datos en Excel.

#### 4.6. Evaluación de la dinámica de agregados

Para estudiar la dinámica de los agregados del suelo se utilizó el modelo teórico conceptual de la Dinámica de Agregados del Suelo (DAS) desarrollado por (Márquez *et al.*, 2019). El

mismo permitió hacer comparaciones entre tres diferentes usos de la tierra seleccionados en este estudio. Se tomó como estado de referencia el suelo bajo páramo para compararlo con los suelos pasto y cultivo, se tomaron los valores de los agregados estables e inestables de la distribución de la estabilidad por tamaño de fracción. Los tres procesos básicos son disrupción, agregación y desestabilización (Figura 3).



**Figura 3.** Dinámica de agregados en el suelo usando el modelo de los agregados (DAS).

(E = agregados estables; I = agregados inestables; F = flujo neto; G = ganancias; x = nuevos macroagregados estables cuando  $F > 0$ ; y = nuevos macroagregados inestables cuando  $F > 0$ ; a = macroagregados estables que permanecen como estables y b = macroagregados estables que se desestabilizan; n = estado de referencia; n+1 = nuevo estado).

#### 4.6.1. Índice de disrupción de agregados (DI)

Es la cantidad relativa de macroagregados (> 250µm) que son inestables con respecto a la cantidad total de muestra de suelo, tal como se expresa en la Ecuación 2.

$$DI = \frac{U_1 + U_2}{T} \quad (2)$$

Donde:

$U_1$  = Cantidad de macroagregados inestables grandes (gramos)

$U_2$  = Cantidad de macroagregados inestables pequeños (gramos)

$T$  = Cantidad total de agregados (gramos)

#### 4.6.2. Índice de formación de macroagregados estables e inestables grandes.

( $FIS_{1,n+1}$ ): es definido como la suma relativa de macroagregados estables grandes que resultan del proceso de agregación (Ecuación 3); y ( $FIU_{1,n+1}$ ), la suma relativa de macroagregados inestables grandes que resultan del proceso de desagregación (Ecuación 4).

$$FIS_{1,n+1} = \frac{x_1}{NF_{1,n+1}} \quad (3)$$

$$FIU_{1,n+1} = \frac{y_1}{NF_{1,n+1}} \quad \text{ó} \quad FIU_{1,n+1} = 1 - FIS_{1,n+1} \quad (4)$$

Donde

$x_1$  = Cantidad de nuevos macroagregados estables grandes que se forman en la fracción 1 (macroagregados grandes) del nuevo estado (gramos)

$y_1$  = Cantidad de nuevos macroagregados inestables que se forman en la fracción 1 del nuevo estado (gramos).

$NF_{1,n+1}$  = Es el flujo neto de los macroagregados grandes (gramos).

#### 4.6.3. Índice de desestabilización de macroagregados estables grandes e Índice de estabilización de macroagregados grandes.

$DSM_{1,n+1}$ , es definido como la cantidad relativa de macroagregados estables de la fracción 1 del estado de referencia que pasan a ser inestables en el nuevo estado (Ecuación 5), por otro lado,  $SSM_{1,n+1}$  es definido como la cantidad relativa de macroagregados estables de la fracción 1 en el estado de referencia que permanecen estables en la misma fracción en el nuevo estado (Ecuación 6).

$$DMS_{1,n+1} = \frac{b_{1,n+1}}{S_{1,n}} \quad (5)$$

$$SSM_{1,n+1} = \frac{a_{1,n+1}}{S_{1,n}} \quad \text{ó} \quad SSM_{1,n+1} = 1 - DSM_{1,n+1} \quad (6)$$

Donde:

$b_{1,n+1}$  = Cantidad de macroagregados que permanecen como inestables en el nuevo estado (fracción 1) (gramos)

$a_{1,n+1}$  = Cantidad de macroagregados que permanecen como estables en el nuevo estado (fracción 1) (gramos).

$S_{1,n}$  = Cantidad total de agregados estables de la fracción 1 en el estado de referencia (gramos).

#### 4.6.4. Índice de formación de macroagregados estables e inestables pequeños.

$FIS_{2,n+1}$  Es definido como la cantidad relativa de macroagregados estables pequeños que resultan de la disrupción y agregación (Ecuación 7), y  $FIU_{2,n+1}$  como la cantidad de macroagregados inestables pequeños que resultan del proceso de desagregación (Ecuación 8).

$$FIS_{2,n+1} = \frac{x_{2,n+1}}{(G_{2,n} + NF_{2,n+1})} \quad (7)$$

$$FIU_{2,n+1} = \frac{y_{2,n+1}}{(G_{2,n} + NF_{2,n+1})} \quad \text{ó} \quad FIU_{2,n+1} = 1 - FIS_{2,n+1} \quad (8)$$

Donde:

$x_{2,n+1}$  = Cantidad de nuevos macroagregados estables pequeños que se forman en la fracción 2 del nuevo estado (gramos).

$y_{2,n+1}$  = Cantidad de nuevos macroagregados inestables pequeños que se forman en la fracción 2 del nuevo estado (gramos).

$G_{2,n}$  = cantidad de ganancias que obtiene la fracción 2 del nuevo estado procedente de la disrupción de macroagregados inestables grandes (fracción 1) del estado de referencia (gramos).

$NF_{2,n+1}$  = Flujo neto de los macroagregados pequeños (gramos).

#### 4.6.5. Índice para la desestabilización de macroagregados pequeños e Índice de estabilización de macroagregados estables pequeños.

$DSM_{2,n+1}$ , Es la cantidad relativa de macroagregados pequeños que permanecen en la fracción 2, que son estables en estado de referencia y se vuelven inestables en el nuevo estado (Ecuación 9); mientras que  $SSM_{2,n+1}$  es la cantidad relativa de macroagregados estables

pequeños que permanecen en la fracción 2, que son estables en el estado de referencia y permanecen estables en el nuevo estado (Ecuación 10).

$$DSM_{2,n+1} = \frac{b_{2,n+1}}{S_{2,n}} \quad (9)$$

$$SSM_{2,n+1} = \frac{a_{2,n+1}}{S_{2,n}} \quad \text{ó} \quad SSM_{2,n+1} = 1 - DSM_{2,n+1} \quad (10)$$

Donde:

$b_{2,n+1}$  es la cantidad de macroagregados que permanecen como inestables en el nuevo estado (fracción 2) (gramos).

$a_{2,n+1}$  es la cantidad de macroagregados que permanecen como estables en el nuevo estado (fracción 2) (gramos).

$s_{2,n+1}$  es la cantidad total de agregados estables de la fracción 2 en el estado de referencia (gramos).

#### 4.6.6. Índice de agregación-disrupción (ADI)

El ADI permite evaluar cualitativa y cuantitativamente la dinámica que conduce al sistema de suelo del estado de referencia al nuevo estado, el mismo se calcula usando la Ecuación 11. Cualitativamente, el signo del índice ADI señala si el proceso dominante que conduce al nuevo estado del sistema es la agregación o la disrupción, o ninguno de ellos; si el signo es positivo (+), domina el proceso de agregación, si es negativo (-) domina el proceso de disrupción y si es cero (0), no domina ningún proceso. Cuantitativamente, el índice ADI es un número que está entre -1 y 1 ( $-1 \leq ADI \leq 1$ ) y permite determinar la cantidad relativa de agregados que resultan de cualquiera de los dos procesos dominantes agregación y/o disrupción.

$$SSM_{2,n+1} = \frac{a_{2,n+1}}{S_{2,n}} \quad \text{ó} \quad SSM_{2,n+1} = 1 - DSM_{2,n+1} \quad (11)$$

Donde:

A = cantidad total de agregados que resultan de la agregación (gramos).

d = cantidad de agregados que constituyen unidades resultado de disrupción adicional (gramos).

$DI_n$  = Índice de disrupción (gramos).

T = cantidad total de suelo (gramos).

$\alpha$  = cantidad neta de agregados en la fracción 2 que resultan de la disrupción de macroagregados inestables grandes. La disrupción adicional es definida en la ecuación 12.

$$ADI = \frac{[A + \alpha] - [DI_n + d]}{T} \quad (12)$$

$$\text{En la Ecuación 13. } x_2 = x_{2G} + x_{2NF} \quad \text{y} \quad y_2 = y_{2G} + y_{2NF} \quad (13)$$

Cuando  $ADI > 0$  el medio que domina el proceso es la agregación, si  $ADI = 0$  no domina ninguno y cuando  $ADI < 0$  la disrupción es el proceso dominante que conduce el sistema al nuevo estado (Garcia *et al.*, 2010).

#### **4.7. Determinación del contenido de carbono en los agregados**

Para la determinación Carbono Orgánico Total (COT) las muestras recolectadas fueron analizadas en el Laboratorio de Servicios Ambientales de la Universidad Nacional de Chimborazo (LSA - UNACH), mediante el método de combustión DUMAS. Primero las muestras fueron secadas en la estufa a 105 °C por dos horas y filtradas en un tamiz de 150 µm. La determinación del COT se realizó en el equipo Organic Elemental Analysis FLASH 2000, el cual utiliza gases de alta pureza como el Oxígeno (para la cámara de combustión) y Helio (gas de transporte). Se calibró el equipo utilizando entre 2-3 mg del padrón BBOT (6,51% de N, 72,53% de C, 6,09% de H y 7,44% de S). Para el análisis de las muestras se pesaron de 10-15 mg de suelo. La temperatura a la cual fueron sometidas las muestras fue de 950 °C por un tiempo de 12 minutos (Cargua *et al.*, 2017).

#### **4.8. Análisis estadístico**

Se realizó un ANOVA de una sola vía ( $p < 0,05$ ), Se realizaron pruebas de normalidad para verificar los supuestos del análisis ANOVA, agrupando los datos por fracciones de agregados estables e inestables y el contenido de carbono asociado a estas fracciones, para detectar diferencias estadísticas entre tratamientos (páramo, pasto y cultivo) se realizaron prueba de medias de Tukey. Para el análisis estadístico se usó el software MINITAB V17 (Minitab, 2016)

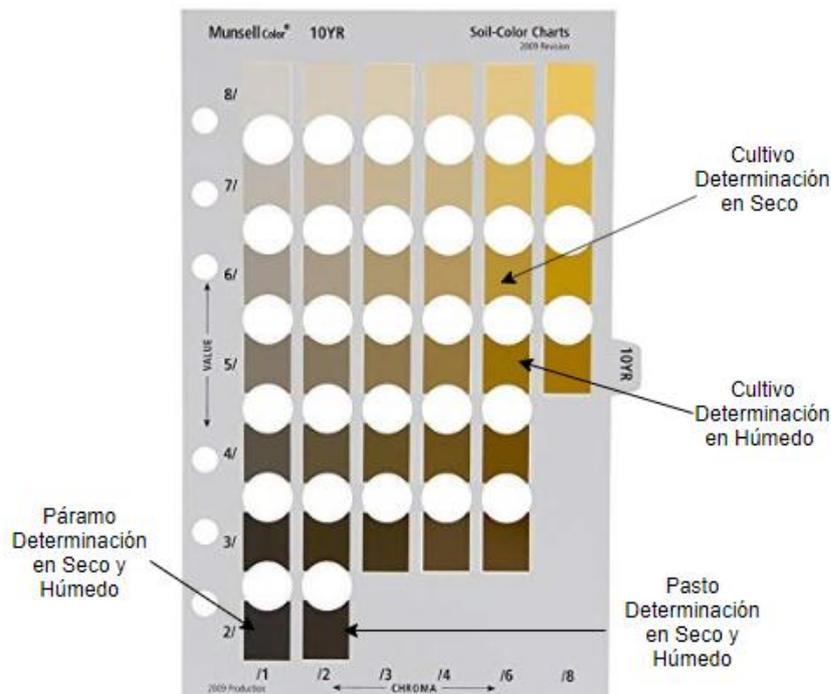
## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Previo al estudio de la dinámica de los agregados y del carbono se estableció un análisis de las características físicas de los suelos (color, textura, densidad aparente, contenido de humedad) y químicas (pH y carbono orgánico total).

### 5.1. Características físicas

#### 5.1.1. Color

En la Figura 4, se observa que, de las muestras de suelo analizadas todas corresponden al matiz 10YR con una variabilidad en la claridad y pureza. Para páramo el valor corresponde 10YR2/1 negro; para pasto 10YR2/2 y para cultivo 10YR6/6 en seco y 10YR5/6 en húmedo. El efecto del cambio de uso sobre esta característica se manifiesta en un incremento del value y el chroma el cual está relacionada claramente en la disminución del aporte en los contenidos de materia orgánica. Valores similares fueron reportados por (Cargua *et al.*, 2014).

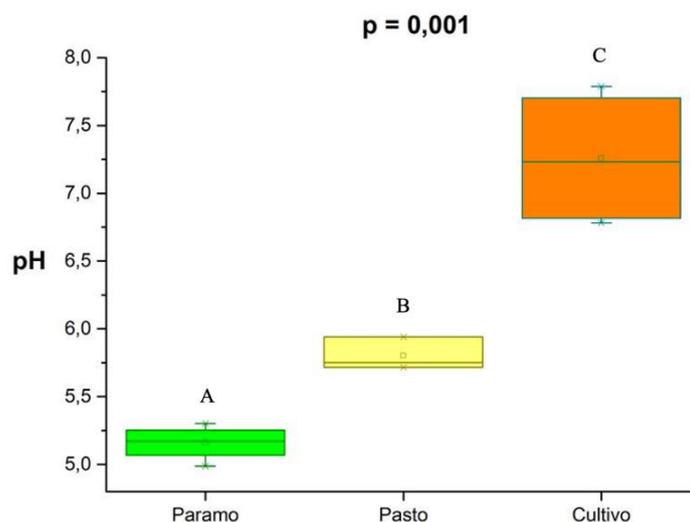


*Figura 4. Color del suelo bajo páramo, pasto y cultivo*

#### 5.1.2. pH

Los valores obtenidos para el pH, caracterizan suelos de ácidos a ligeramente ácidos. El pH del suelo de páramo varía entre 4,9 a 5,2 (Figura 5) con un valor medio de 5,08 que corresponde a un pH ligeramente ácido; estos resultados son similares a los valores reportas

por (Quichimbo *et al.*, 2012). Para el caso de pasto se encontró valores que van desde 5,71 a 5,94 con una media de 5,8 que corresponde a un pH ligeramente ácido y, por último, tenemos los suelos utilizados para la agricultura los mismos que presenta un valor de pH medio de 7,26 (Figura 5), esto debido a que son suelos que dentro de sus planes de manejo se utiliza la incorporación de fertilizantes nitrogenados y aplicación de encalado.



**Figura 5.** pH del suelo bajo páramo, pasto y cultivo

Letras (A, B y C), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )

### 5.1.3. Textura, densidad aparente y humedad

En la Tabla 2, se reporta los análisis de varianza para la variable textura, densidad aparente y humedad. Podemos observar una clara disminución de la fracción fina (limo+arcilla) cuando sucede el remplazo de páramo a pasto o cultivo. Esto es debido a que este cambio de uso deja al suelo desnudo expuesto al impacto de la lluvia que rompe y desagrega los suelos con su concomitante erosión. Esto es más evidente en el suelo bajo cultivo el cual permanece con una cobertura menos densa.

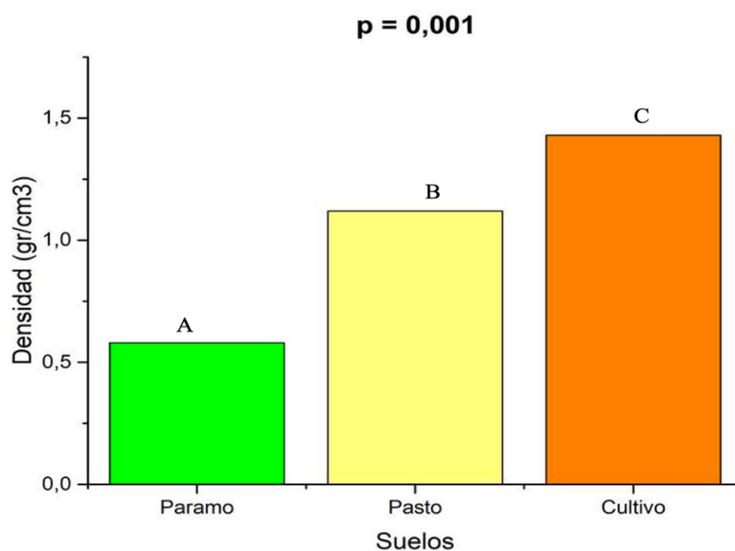
**Tabla 2.** Textura del suelo bajo páramo, pasto y cultivo.

Variable	ANOVA $p$ Valor	Media Páramo	Media Pasto	Media Cultivo
Arena	0,001	17 a	21 b	35 c
Limo y arcilla	0,001	83 a	80 a	65 c

Letras (a, b y c), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )

La densidad aparente (DA) del suelo es una propiedad que nos permite conocer el grado de porosidad, aireación y su capacidad de drenaje. De ahí que la DA que posee cada uno de los usos de suelo del área de estudio es: páramo  $0,58 \text{ g/cm}^3$ , pasto  $1,12 \text{ g/cm}^3$  y cultivo  $1,43$

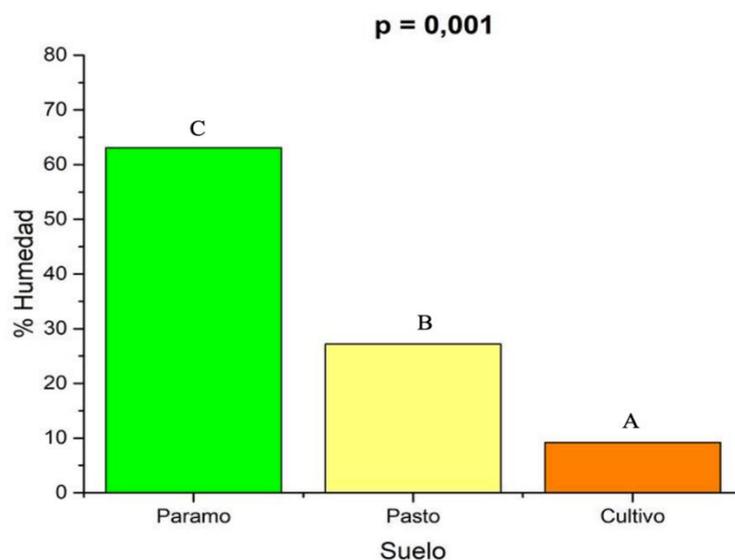
g/cm<sup>3</sup> (Figura 6). El efecto del cambio de uso sobre esta característica se manifiesta en incrementos de la densidad aparente. Los valores más bajos se asocian a suelos de origen volcánico que poseen un alto contenido de materia orgánica y los valores comienzan aumentar en la medida que el suelo sufre compactación por efectos de los cambios de uso de páramo a pasto y cultivo. Esto se da por efecto de la maquinaria, labranza y el pastoreo de animales, coincidiendo con valores reportados por (Quichimbo *et al.*, 2012).



**Figura 6.** Densidad aparente del uso de suelo, páramo, pasto y cultivo.

Letras (A, B y C), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )

El porcentaje del contenido de humedad en los diferentes usos de suelo están distribuidos de la siguiente manera: páramo (63,08%), pasto (27,22%) y cultivo (9,21%) (Figura 7). Estos valores se relacionan directamente con los valores de densidad aparente ya que a valores de densidad aparente más bajo la porosidad aumenta y por ende la capacidad de estos suelos de retener más agua. Esta variabilidad en la humedad del suelo nos indica que existe una mayor retención en áreas de páramo en comparación con el cultivo. De ahí la importancia de conservar el páramo por su alta capacidad de retención hídrica, la cual obedece a ciertas características físicas del suelo como: baja densidad aparente, alta porosidad y condiciones de consistencia muy friable (Daza, Hernández, & Triana, 2014).



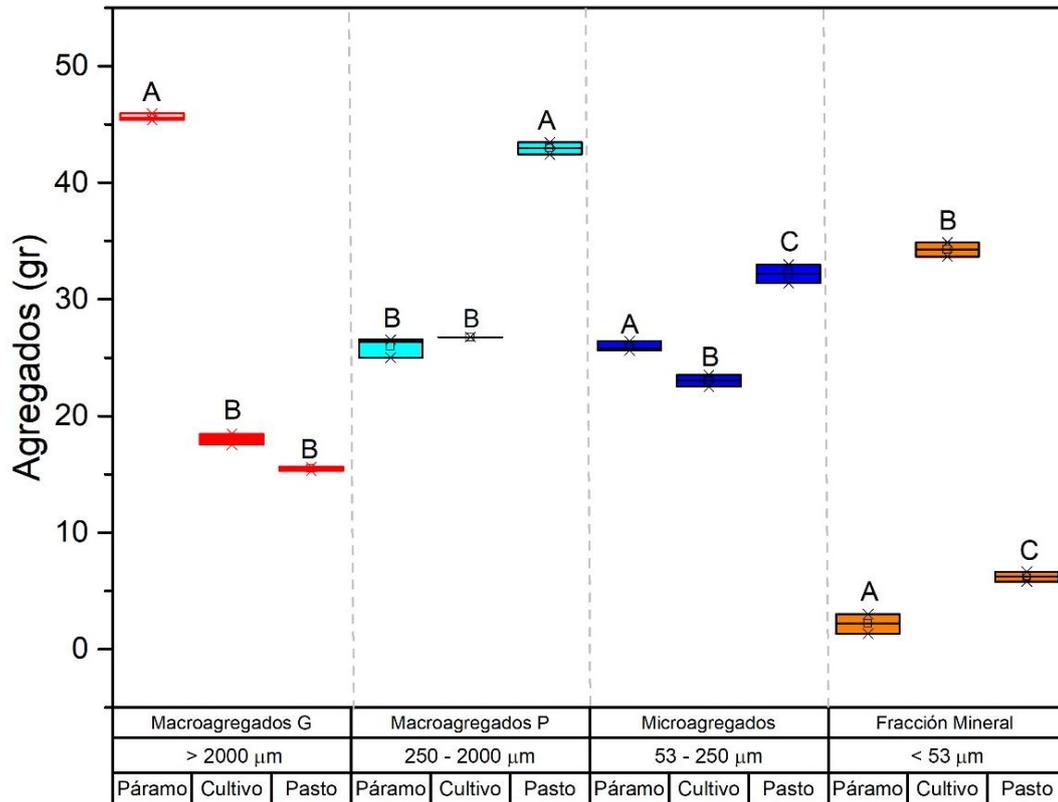
**Figura 7.** Contenido de humedad del uso de suelo páramo, pasto y cultivo

*Letras (A, B), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )*

## 5.2. Distribución de agregados por tamaño y estabilidad

### 5.2.1. Tratamiento en seco

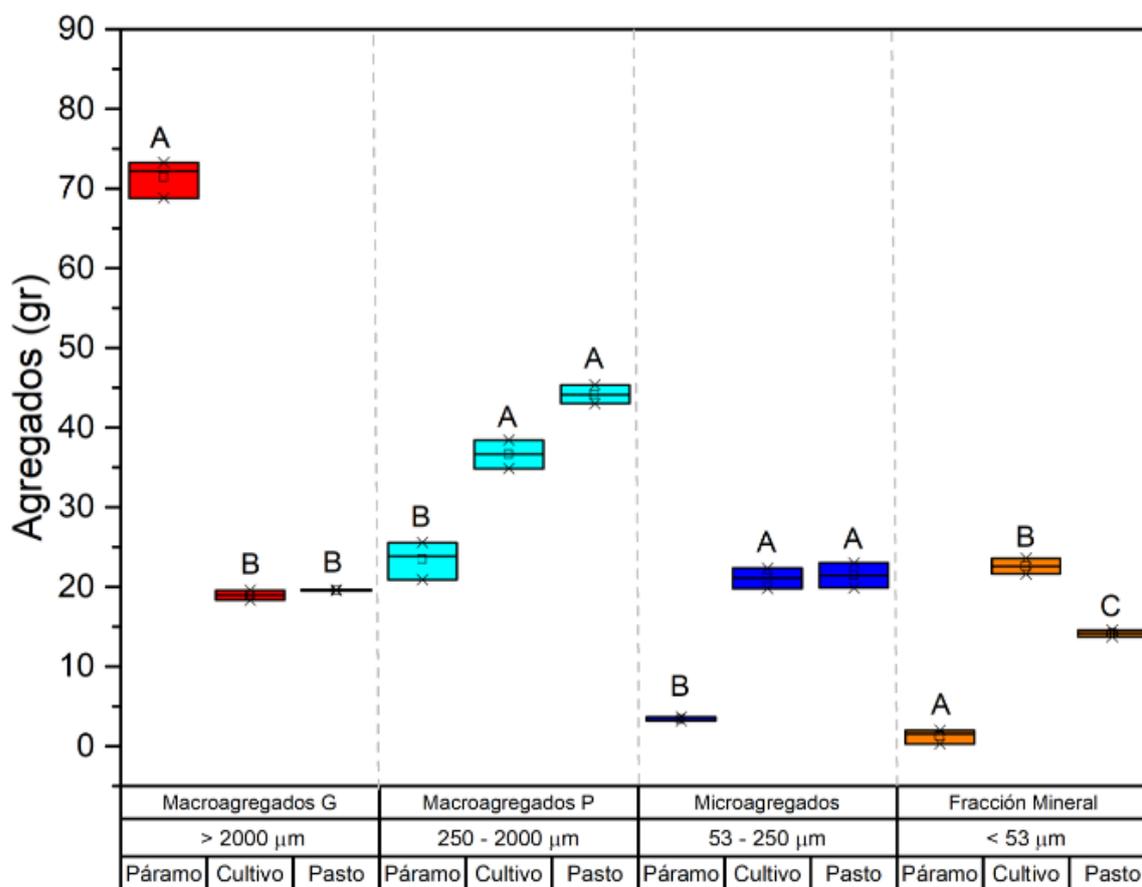
La proporción de agregados por tamaño se muestra en la Figura 8. La distribución de agregados por tamaño y estabilidad cuando se realizó el tratamiento en seco dando como resultado que en el caso del páramo el 45,8% corresponde a macroagregados grandes seguido por pasto con un 18,1% y el en el cultivo 15,5%. En lo referente a los macroagregados pequeños, la distribución indica que el páramo tiene 26,0 %, pasto 43,2% y cultivo constituye el 26,9%. Los microagregados bajo páramo constituyen el 26,0%, pasto 32,40% y cultivo constituye el 23,1%. Finalmente, la fracción mineral, páramo 2,2%, pasto 6,3% y cultivo 34,4% que representa la mayor cantidad de estos agregados.



**Figura 8.** Distribución de agregados por tamaño (Tratamiento en seco)  
 Letras (A, B), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )

### 5.2.2. Tratamiento en húmedo

El tratamiento en húmedo determinó que los macroagregados grandes en páramo es (71,4%), pasto (19,6%) y cultivo (19%). Es importante indicar que el páramo muestra un incremento del 26 % en relación al tratamiento en seco. En cuanto a los macroagregados pequeños la distribución indica que el páramo tiene (23,5 %), pasto (44,2%) mientras en el cultivo constituyen el (36,6%). Los microagregados bajo páramo (3,4%), pasto (21,5%) y cultivo (21,1%). Finalmente, la fracción mineral: páramo (1,3%), pasto (14,2%) y la mayor cantidad de estos agregados le corresponde a cultivo (22,6%) (Figura 9).



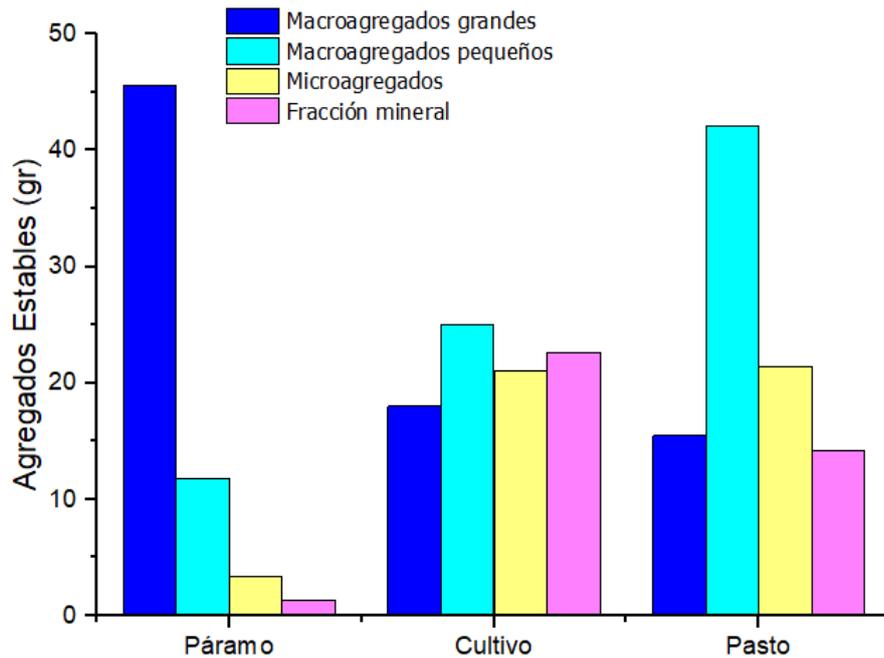
**Figura 9.** Distribución de agregados del suelo (Tratamiento en húmedo).

Letras (A, B), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )

La distribución de agregados en el tratamiento en húmedo presenta diferencias significativas entre el páramo y sus reemplazos (pasto – cultivo), sin embargo, entre el pasto y el cultivo no se visualiza diferencia significativa a excepción de la fracción mineral.

### 5.2.3. Distribución de agregados estables e inestables

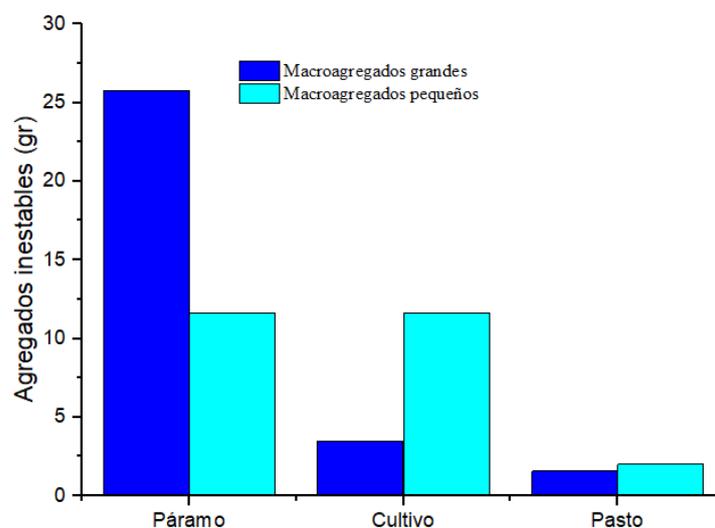
Los macroagregados estables grandes (2 mm) representan un 45,6% en suelos localizados bajo páramo, este valor significativamente más alto que en suelos localizados en pasto (18%) y cultivo (16%) respectivamente. Los macroagregados estables pequeños (0,25 - 2 mm) fueron significativamente más altos en los suelos localizados en pasto (42,2%) y cultivo (25%). Los microagregados (53 – 250 μm) fueron significativamente menores en páramo. (Figura 10).



**Figura 10.** Distribución de los agregados estables del uso de suelo

Letras (A, B), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )

La cantidad de macroagregados inestables grandes aumenta en el suelo bajo páramo (25,8%) y en el cultivo (3,5%) a diferencia del pasto (1,6%), similar a estos, la cantidad de macroagregados inestables pequeños son iguales en el páramo (11,6%) y en el cultivo (11,6%), mientras el pasto posee una inestabilidad de macroagregados pequeños del 2% (Figura 11).



**Figura 11.** Distribución de agregados inestables del uso del suelo

Letras (A, B), muestran diferencias significativas mediante el test de Tukey ( $p < 0,05$ )

La formación de agregados del suelo es el resultado complejo de la interacción entre procesos biológicos, químicos y físicos en el suelo (Tisdall & Oades, 1982; Marquez *et al.*, 2017). Los factores que agrupan la estabilidad de agregados en el suelo pueden ser agrupados en abióticos (arcillas, sesquióxidos, cationes), bióticos (materia orgánica, actividad de las plantas, fauna y microorganismos) y del medioambiente (temperatura y humedad del suelo) (Chen *et al.*, 1998). Por lo tanto, en suelo bajo páramo en condiciones de no disturbancia existe una continua entrada de materia orgánica que permite mantener la estabilidad de los agregados.

### 5.3. Índices de estabilidad de macroagregados estables e inestables del suelo de páramo y cultivo

#### 5.3.1. Índice de disrupción de agregados (DI)

El DI se presenta cuando los macroagregados grandes inestables se fragmentan producto de un cambio de uso de suelo y como resultado estas son redistribuidas en fracciones más pequeñas. En el presente análisis la disrupción de los agregados del suelo se distribuyó de la siguiente manera: páramo 38%, pasto 4% (Tabla 5) y cultivo 15% (Tabla 6).

**Tabla 3.** Indicadores de la dinámica de agregados del suelo (Pasto)

	$FIS_{n+1}$	$FIU_{n+1}$	$DSM_{n+1}$	$SSM_{n+1}$
Macroagregados grandes	0,00	0,00	0,61	0,40
Macroagregados pequeños	0,94	0,06	0,00	1,00

	$DI$	$x_2$	$y_2$	$TU$	$A$	$D$	$\alpha$	$ADI$
Páramo ( $n$ ) →	0,38			37,41				
Pasto ( $n+1$ ) →		30,34	2,00	3,6	4,5	26,05	1,75	-0,45

*FIS* = índice de formación de macroagregados estables. *FIU* = índice de formación de macroagregados inestables. *DSM* = índice de desestabilización de macroagregados estables. *SSM* = índice de estabilización de macroagregados estables.  $x_2$  = cambio neto de macroagregados estables ( $x_2 = S_{2,n+1} - a_2$ ).  $y_2$  = cambio neto de macroagregados inestables ( $y_2 = U_{2,n+1} - b_2$ ). *TU* es la cantidad total de macroagregados inestables *A* = agregados que resultan de la agregación. *d* = agrega unidades constituyentes que resultan de la interrupción, *ADI* = índice de interrupción de la agregación.

#### 5.3.2. Índice de formación de macroagregados estables e inestables grandes.

Una vez que el suelo de páramo cambia a un nuevo estado (pasto) por intervención antropogénica, este no presenta formación de macroagregados grandes estables e inestables ( $FIS_{n+1} = 0$ ;  $FIU_{n+1} = 0$ ), mientras que los macroagregados pequeños muestran gran

predominio de formación de macroagregados estables pequeños ( $FIS_{n+1} = 0,94$ ) y una mínima cantidad de macroagregados inestables pequeños ( $FIU_{n+1} = 0,06$ ) (Tabla 5). En el nuevo estado (cultivo), la formación de macroagregados estables ( $FIS_{n+1} = 0,50$ ) y de macroagregados inestables ( $FIU_{n+1} = 0,50$ ) es similar. La diferencia en la formación de macroagregados estables e inestables entre el pasto y cultivo va determinada por el uso del suelo que implique mayor intervención (impacto); por tanto, una vez causada la disrupción de macroagregados inestables grandes de los suelos de páramo pasan a formar parte de fracciones más pequeñas, valores similares han sido reportados por (García *et al.*, 2010; Márquez *et al.*, 2019).

### 5.3.3. Índice de desestabilización de macroagregados estables grandes e Índice de estabilización de macroagregados grandes.

Al reemplazo del páramo por pasto se desestabiliza el 61% de macroagregados estables grandes ( $DSM_{n+1} = 0,61$ ) y permanecen como estables el 40% ( $SSM_{n+1} = 0,40$ ) (Tabla 5). Para el caso del cultivo, este difiere en su totalidad; pues en este se genera una desestabilización de los macroagregados estables grandes del 66% ( $DSM_{n+1} = 0,66$ ) mientras que el 34% ( $SSM_{n+1} = 0,34$ ) permanecen como estables (Tabla 6).

En discrepancia a los macroagregados estables grandes, los macroagregados estables pequeños no presentan desestabilización alguna ya que tanto en el suelo bajo pasto como cultivo permanecen como estables el 100% ( $SSM_{n+1} = 1,00$ )

**Tabla 4.** Indicadores de la dinámica de agregados del suelo (cultivo)

	$FIS_{n+1}$	$FIU_{n+1}$	$DSM_{n+1}$	$SSM_{n+1}$
Macroagregados grandes	0,00	0,00	0,66	0,34
Macroagregados pequeños	0,50	0,50	0,00	1,00

	$DI$	$x_2$	$y_2$	$TU$	$A$	$D$	$\alpha$	$ADI$
Páramo ( $n$ ) →	0,38			37,41				
Cultivo ( $n+1$ ) →		13,19	11,62	15,62	4,85	26,66	14,16	-0,45

*FIS = índice de formación de macroagregados estables. UIF = índice de formación de macroagregados inestables. DSM = índice de desestabilización de macroagregados estables. MSE = índice de estabilización de macroagregados estables. A = agregados que resultan de la agregación. agrega unidades constituyentes que resultan de la interrupción, ADI = índice de interrupción de agregación.*

### 5.3.4. Índice de agregación-disrupción (ADI)

La magnitud del impacto provocado por el reemplazo del páramo a pasto o a cultivo está dada por el Índice de agregación-disrupción ( $ADI = -0,45$ ) que muestra una disrupción total en los agregados para los dos casos. Este valor sugiere que la fragilidad del páramo al ser

intervenido es muy alta, pues se desagregan cerca del 50% de los agregados iniciales para dar paso a la formación de nuevos agregados en fracciones más pequeñas. Sin embargo, basándose en la distribución de agregados que se desarrollan con el pasto, los macroagregados grandes pasan a ser macroagregados pequeños (Figura 9) mientras en el suelo bajo cultivo los macroagregados grandes se destruyen y pasan a formar parte de las fracciones más pequeñas que por lo general son casi uniformes (Figura 10).

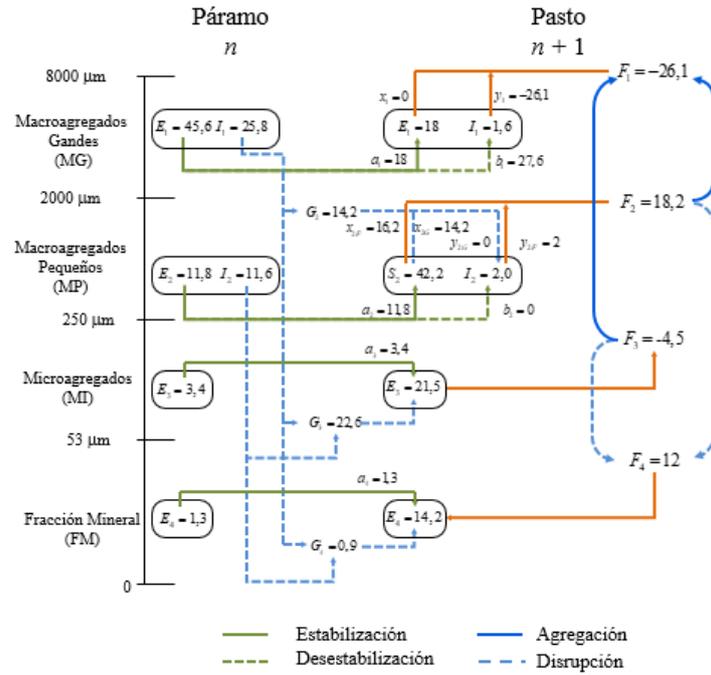
Los suelos bajo pasto se caracterizan por mantener un balance de nutrientes mediante la incorporación regular de residuos vegetales. El crecimiento de las raíces, mejora la cantidad y calidad de humus, promoviendo la formación y estabilización de agregados con la consecuente estabilización y protección de la materia orgánica. Los elementos acumulados se mantienen en una dinámica de intercambio catiónico en estos suelos, lo cual implica un empobrecimiento de las bases y una estabilidad del complejo orgánico mineral (García *et al.*, 2010).

La eliminación de la vegetación protectora presente antes del cambio del uso causa una exposición del suelo al aire, aumentando la evaporación. Cuando este proceso ocurre, se tiende a alterar el balance entre el agua y la materia orgánica. Este proceso trae como consecuencia un aumento en la descomposición de la materia orgánica en el suelo. Este efecto es muy significativo, porque los suelos volcánicos poco desarrollados que se encuentra en la mayoría de los páramos se secan irreversiblemente y no recuperan su morfología original (Camacho, 2013).

#### **5.4. Dinámica de los agregados del suelo bajo páramo y cultivo.**

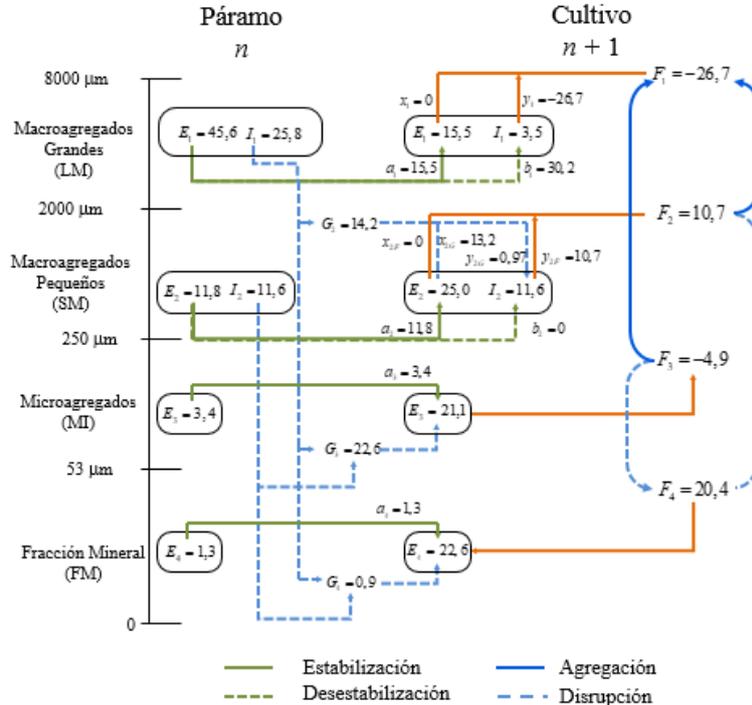
##### **5.4.1. Disrupción**

Del total de macroagregados inestables grandes ( $I_1 = 25,8$ ) en el suelo bajo páramo la distribución (Figura 12) es de la siguiente manera: macroagregados pequeños 55% ( $G_2 = 14,2$ ), microagregados ( $G_3 = 22,6$ ) y fracción mineral ( $G_4 = 0,9$ ).



**Figura 12.** Dinámica de agregados (Pasto) en el suelo usando el modelo DAS.

Estado de referencia, páramo; nuevo estado, pasto ( $E$  = agregados estables;  $I$  = agregados inestables;  $F$  = flujo neto;  $G$  = ganancias;  $x$  = nuevos macroagregados estables cuando  $F > 0$ ;  $y$  = nuevos macroagregados inestables cuando  $F > 0$ ;  $a$  = macroagregados estables que permanecen como estables y  $b$  = macroagregados estables que se desestabilizan;  $n$  = estado de referencia;  $n+1$  = nuevo estado (pasto)).



**Figura 13.** Dinámica de agregados (Cultivo) en el suelo usando el modelo DAS

Estado de referencia, páramo; nuevo estado, cultivo ( $E$  = agregados estables;  $I$  = agregados inestables;  $F$  = flujo neto;  $G$  = ganancias;  $x$  = nuevos macroagregados estables cuando  $F > 0$ ;  $y$  = nuevos macroagregados inestables cuando  $F > 0$ ;  $a$  = macroagregados estables que permanecen como estables y  $b$  = macroagregados estables que se desestabilizan;  $n$  = estado de referencia;  $n+1$  = nuevo estado (cultivo))

Similares datos reporta (García *et al.*, 2010) en suelos bajo pasto ya que la presencia de raíces genera mayor estabilidad para los mismos, permitiendo a los macroagregados grandes distribuirse en la fracción más próxima (macroagregados pequeños) en un 65%.

#### 5.4.2. Estabilización/ desestabilización

En la Figura 12 se observa que el reemplazo de páramo a pasto generó una desestabilización del 61% en los macroagregados estables grandes ( $b_1 = 27,6$ ), mientras el 39 % permanece como estable ( $a_1 = 18$ ) en la misma fracción. Los macroagregados estables pequeños no presentan desestabilización alguna ( $b_2 = 0$ ) debido a que el 100% permanece como estable ( $a_2 = 11,8$ ). Similares características presento la fracción de microagregados ( $a_2 = 3,4$ ) y mineral ( $a_2 = 1,3$ ).

El reemplazo del páramo por cultivo presenta una desestabilización del 66% en los macroagregados estables grandes ( $b_1 = 30,2$ ) mientras el 34 % permanece como estable ( $a_1 = 15,5$ ) en la misma fracción. Los macroagregados estables pequeños no presentan desestabilización alguna ( $b_2 = 0$ ) ya que el 100% permanece como estable ( $a_2 = 11,8$ ), similar es el caso de las pequeñas fracciones, microagregados ( $a_2 = 3,4$ ) y fracción mineral ( $a_2 = 1,3$ ).

#### 5.4.3. Agregación

El flujo neto de los macroagregados grandes con signo negativo ( $F_1 = -26,1$ ) resulta en la salida de estos macroagregados hacia otras fracciones cuando el suelo es reemplazado por pasto. En la Figura 12 se observa que no existe formación de agregados grandes tanto estables ( $x_1 = 0$ ) como inestables ( $y_1 = -26,1$ ), mientras el flujo neto de los macroagregados pequeños, con signo positivo ( $F_2 = 18,2$ ) muestra la entrada de agregados de otras fracciones para la formación de nuevos macroagregados pequeños que se distribuyen entre macroagregados pequeños estables ( $x_{2F} = 16,2$ ) e inestables ( $y_{2F} = 2$ ).

El total de ganancias ( $G_2 = 14,2$ ) producto de la disrupción de macroagregados inestables grandes resulta en el total de macroagregados estables pequeños ( $x_{2G} = 14,2$ ). La figura 12 también muestra como el flujo neto de los microagregados ( $F_3 = -4,5$ ) presenta signo negativo, incurriendo en la formación de la fracción mineral ( $F_4 = 12$ ).

El flujo neto de los macroagregados grandes en el cambio de páramo a cultivo es de signo negativo ( $F_1 = -26,7$ ), lo cual resulta una salida de estos macroagregados hacia otras fracciones, cuando el suelo es reemplazado por pasto. En la Figura 12 se observa la no

formación de agregados grandes tanto estables ( $x_1 = 0$ ) como inestables ( $y_1 = -26,7$ ). En divergencia a la fracción anterior, el flujo neto de los macroagregados pequeños posee signo positivo ( $F_2 = 10,7$ ), lo cual indica la entrada de agregados de otras fracciones para la formación de nuevos macroagregados pequeños inestables ( $y_{2F} = 10,7$ ).

Del total de ganancias ( $G_2 = 14,2$ ) producto de la disrupción de macroagregados inestables grandes, el 92% ( $x_{2G} = 13,2$ ) se distribuye a los microagregados estables pequeños, mientras el 8% ( $y_{2G} = 0,97$ ) pasa a ser macroagregados pequeños inestables. La figura 12 también muestra como el flujo neto de los microagregados ( $F_3 = -4,9$ ) presenta signo negativo, incurriendo en la formación de la fracción mineral ( $F_4 = 20,4$ ).

## **5.5. Dinámica del carbono. (mg C/ kg agg)**

### **5.5.1. Disrupción**

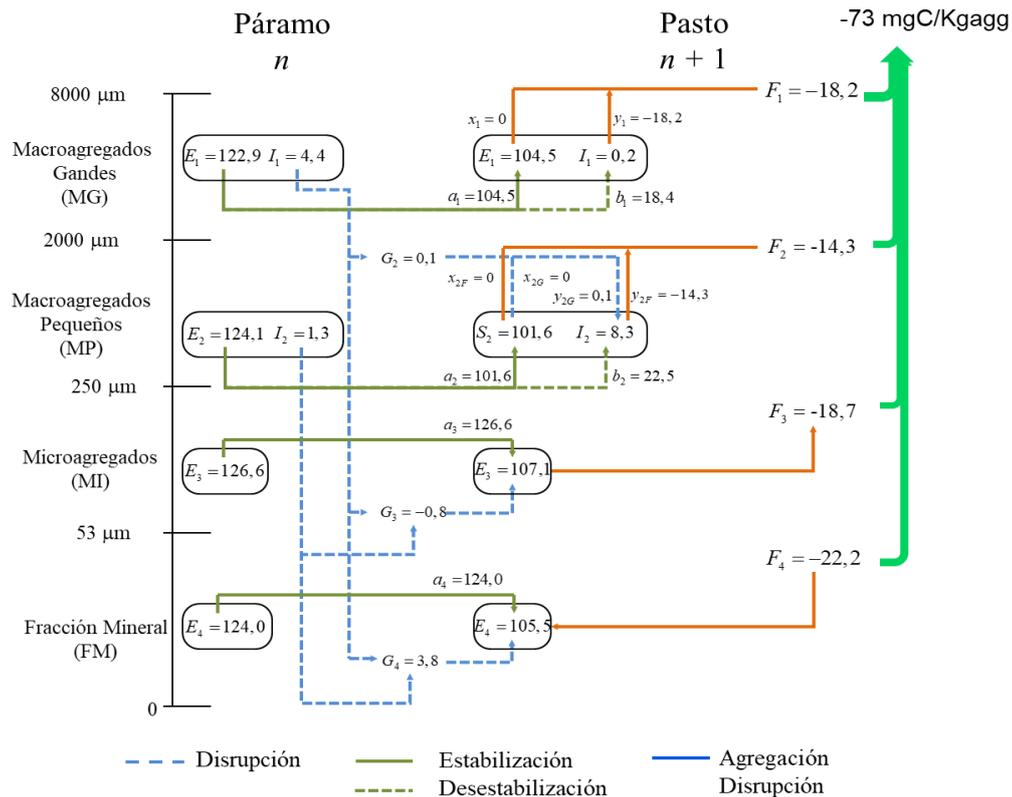
El contenido de carbono en los macroagregados grandes del suelo de páramo se encuentra distribuido de la siguiente forma: estables ( $E = 122,9$  mg C/kg agg) e inestables ( $I = 4,4$  mg C/kg agg). Para los nuevos estados suelos bajo pasto, el contenido de carbono presente en los macroagregados grandes inestables se distribuye como ganancia ( $G_2 = 0,1$ ) representando el 2,2% para los macroagregados pequeños, como ( $G_3 = 0,8$ ) para los microagregados. Para la fracción mineral la ganancia de contenido de carbono para el nuevo estado es del 87 % ( $G_4 = 3,8$ ) y la cantidad presente en la disrupción dentro de los macroagregados pequeños inestables es ( $I_2 = 1,3$ ).

Consecuentemente de manera similar la cantidad de carbono presente en el estado de referencia en macroagregados inestables ( $I = 4,4$ ) al nuevo estado (suelos bajo cultivo) se distribuye de la siguiente manera: macroagregados pequeños ( $G_2 = 0,1$ ), microagregados ( $G_3 = 0,8$ ) y la fracción mineral ( $G_4 = 3,8$ ) Esta distribución indica que, al existir desestabilización de los agregados principalmente inestables, el contenido de carbono tiende a permanecer secuestrado dentro de la fracción mineral.

Los secuestros del carbono asociados al ciclo de formación de agregados del suelo reportan que cuanto está asociado a los macroagregados es un carbono orgánico fresco o parcialmente descompuesto; mientras que a medida que aumenta en las fracciones más pequeñas este se descompone muy fácilmente y como resultado se muestra un carbono relativamente estable (Pedraza & Márquez, 2010).

### 5.5.2. Estabilización/desestabilización pasto-cultivo.

La desestabilización de agregados en los suelos bajo páramo produce pérdidas hasta en un 15% de carbono cuando se da un cambio de suelo a pasto, manteniéndose únicamente ( $a_1 = 104,5$ ) en los macroagregados grandes estables y como inestables ( $b = 18,4$ ) en los macroagregados grandes, mientras que el 82% del carbono dentro de los macroagregados pequeños permanece como estable ( $a_2 = 101,6$ ) y el 18% como inestable ( $b = 22,5$ ) una vez se ha producido la intervención.

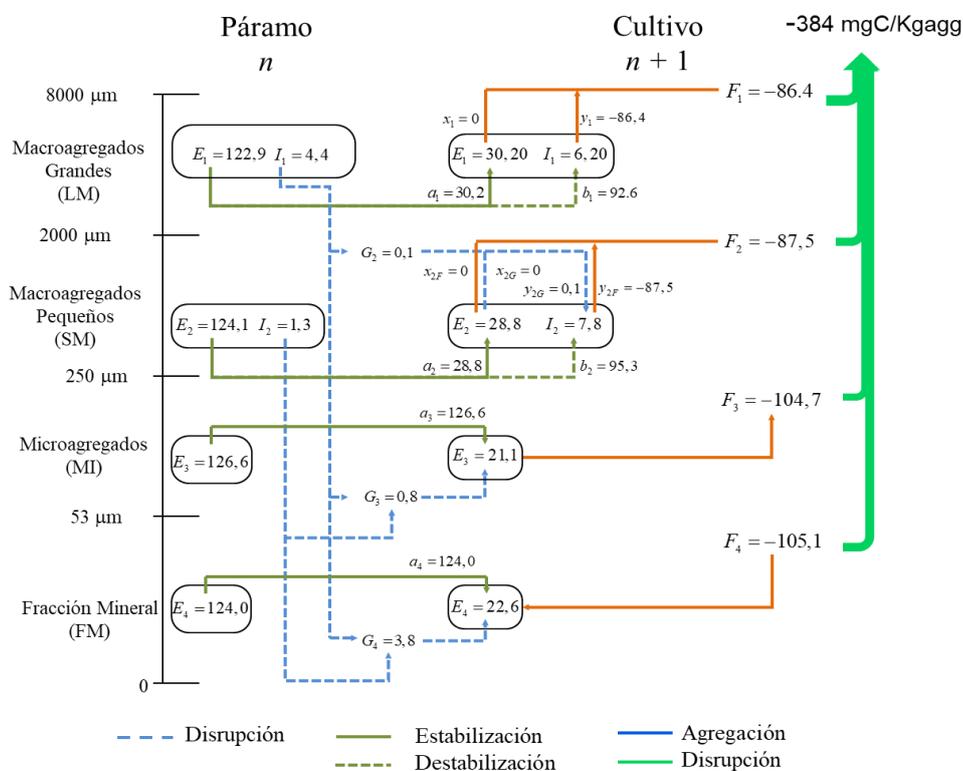


**Figura 14.** Dinámica del carbono orgánico asociado a los agregados de suelo (Pasto)

Estado de referencia, páramo; nuevo estado, pasto ( $E =$  agregados estables;  $I =$  agregados inestables;  $F =$  flujo neto;  $G =$  ganancias;  $x =$  nuevos macroagregados estables cuando  $F > 0$ ;  $y =$  nuevos macroagregados inestables cuando  $F > 0$ ;  $a =$  macroagregados estables que permanecen como estables y  $b =$  macroagregados estables que se desestabilizan;  $n =$  estado de referencia;  $n+1 =$  nuevo estado (cultivo)).

De igual manera, el cambio del uso del páramo a cultivo genera cambios en los contenidos del carbono cuando ocurre la desestabilización. Dentro de los macroagregados grandes, la cantidad de carbono se mantiene en los macroagregados grandes estables en un 24% ( $a_1 = 30,20$ ) y se produce la desestabilización de carbono en un 76% ( $b_1 = 92,6$ ) que pasa a formar parte del carbono de los inestables. En el caso de los macroagregados pequeños el carbono dentro de los macroagregados pequeños disminuye un 77 % ( $b_2 = 95,2$ ) manteniéndose solo un 23% como estable ( $a_2 = 28,8$ ), este cambio en las concentraciones

del carbono se da por la degradación de la estructura del suelo a causa del uso agrícola. Así mismo, resulta del efecto combinado de la pérdida de la materia orgánica, de la disminución de la porosidad y del aumento de la densidad aparente del suelo (Ortiz, 2016).



**Figura 15.** Dinámica del carbono orgánico asociado a los agregados de suelo (Cultivo)

Estado de referencia, páramo; nuevo estado, cultivo ( $E$  = agregados estables;  $I$  = agregados inestables;  $F$  = flujo neto;  $G$  = ganancias;  $x$  = nuevos macroagregados estables cuando  $F > 0$ ;  $y$  = nuevos macroagregados inestables cuando  $F > 0$ ;  $a$  = macroagregados estables que permanecen como estables y  $b$  = macroagregados estables que se desestabilizan;  $n$  = estado de referencia;  $n+1$  = nuevo estado (cultivo)).

### 5.5.3. Agregación

El flujo neto de carbono al existir reemplazo de páramo hacia pasto presenta dentro de los macroagregados grandes un flujo neto negativo ( $F_1 = -18,2$ ) indicando la pérdida de carbono al ser liberado dentro de los macroagregados hacia las demás fracciones, además no existe ingreso de carbono por la no formación de agregados grandes estables ( $x_1 = 0$ ), a diferencia del cultivo donde el flujo neto en los macroagregados grandes tiene signo positivo ( $F_1 = 0,35$ ) indicando la incorporación de carbono mediante la formación de los macroagregados grandes estables ( $x_1 = 4,5$ ) y no estables ( $y_1 = -4,2$ ) (Figura 14). Dentro de los macroagregados pequeños en suelos de pasto tenemos un flujo neto negativo ( $F_2 = -14,3$ ) lo que representa pérdida de carbono por la no formación de macroagregados pequeños

estables ( $x_{2F} = 0$ ), sin embargo, si se evidencia la formación de macroagregados pequeños inestables ( $y_{2F} = -14,3$ ). La cantidad de carbono proveniente de la ganancia ( $G_2 = 0,1$ ) que pasa a formar parte de los macroagregados pequeños estables es ( $x_{2G} = 0$ ) mientras que como inestables permanece ( $y_{2G} = 0,1$ ). De manera similar dentro de los suelos de cultivo el flujo neto también es negativo ( $F_2 = -87,5$ ) indicando nula la incorporación de carbono en los macroagregados pequeños estables ( $x_{2F} = 0$ ) manteniéndose solamente como inestables ( $y_{2F} = -87,5$ ) la cantidad de carbono proveniente de la ganancia ( $G_2 = 0,1$ ) que pasa a formar parte de los macroagregados pequeños estables es ( $x_{2G} = 0$ ) mientras que como inestables aparece ( $y_{2G} = 0,1$ ).

El flujo neto de carbono al existir reemplazo de paramo hacia cultivo presenta dentro de los macroagregados grandes un flujo neto negativo ( $F_1 = -86,4$ ) indicando la pérdida de carbono al ser liberado dentro de los macroagregados hacia las demás fracciones, además no existe ingreso de carbono por la no formación de agregados grandes estables ( $x_1 = 0$ ), indicando la incorporación de carbono mediante la formación de los macroagregados grandes inestables de los estables ( $y_1 = -84,2$ ).

Dentro de los suelos de cultivo el flujo es ( $F_3 = -104,7$ ) con una ganancia de ( $G_3 = -0,8$ ) también pierde más carbono de lo ingresa, el flujo neto de la fracción mineral es ( $F_4 = -105,1$ ) con ganancias de carbono de los microagregados ( $G_3 = 3,8$ ), el cambio a cultivo genera flujos negativos principalmente a partir de los macroagregados pequeños representando que se pierde mayor cantidad de carbono por lo que el grado de afectación es mayor en términos de liberación del carbono del suelo.

## 6. CONCLUSIONES

- En su estado natural, el suelo de páramo contiene en todas sus fracciones una cantidad de carbono de 503,1 mg C/kg agg, con el cambio de uso a pasto se perdió 73 mg C /kg agg y en el cultivo se perdió 384 mg C /kg agg. Debido al grado de intervención como remoción periódica del suelo, riego y uso de fertilizantes, el suelo bajo cultivo pierde mayor cantidad de carbono evidenciado también a través del color del mismo.
- El cambio de páramo a pasto o cultivo en el área estudiada, produjo cambios significativos en los valores de pH, densidad aparente y contenido de humedad en los suelos, debido a los procesos que se desarrollan en los suelos además del grado de intervención.
- El impacto provocado al suelo de páramo y su reemplazo por pasto y cultivo se ve reflejado en el tamaño y estabilidad de los agregados. El suelo de páramo está representado en su mayoría por macroagregados grandes y al reemplazarlo por pasto estos macroagregados grandes se desestabilizan, pero finalmente quedan dispuestos en macroagregados pequeños, a diferencia del cultivo que sugiere un cambio brusco y los agregados cuando se desestabilizan pasan a formar parte de fracciones pequeñas como microagregados y en mayor cantidad de la fracción mineral.
- El estudio de la dinámica de los agregados del suelo de páramo indica que predominan los procesos de degradación con un valor del Índice de Agregación-Disrupción (-0,45) para los dos usos de suelo (pasto, cultivo). Sin embargo, difieren por la capacidad que poseen los agregados de formar nuevos agregados.

## **7. RECOMENDACIONES**

- Considerar la información contenida en este documento como antecedente para la toma de decisiones en planes de manejo sustentable de los páramos.
- Establecer nuevos estudios en los mismos puntos de muestreo, que permitan evaluar la funcionalidad del suelo de acuerdo a sus funciones.
- Utilizar otros métodos para evaluar el impacto provocado sobre el ecosistema páramo cuando es reemplazado por pasto o cultivo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Beretta, A., Bassahum, D., & Musselli, R. (2014). ¿Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando? *Agrociencia Uruguay*, 18(2), 90-94.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2006). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Cuenca*. Recuperado: [http://www.paramo.org/files/hidrologia\\_paramo.pdf](http://www.paramo.org/files/hidrologia_paramo.pdf).
- Beretta, A., Bassahum, D., & Musselli, R. (2014). ¿Medir el pH del suelo en la mezcla suelo: agua en reposo o agitando? *Agrociencia Uruguay*, 18, 90–94. Retrieved from [http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2301-15482014000200010&nrm=iso](http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482014000200010&nrm=iso)
- Brognez, D., Ballabio, C., Stevens, A., Jones, R. J. A., Montanarella, L., & van Wesemael, B. (2015). A map of the topsoil organic carbon content of Europe generated by a generalized additive model. *European Journal of Soil Science*, 66(1), 121–134. <https://doi.org/10.1111/ejss.12193>
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bievre, B., & Cisneros, F. (2014). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad.
- Buytaert, Wouter, Deckers, J., & Wyseure, G. (2006). Description and classification of nonallophanic Andosols in south Ecuadorian alpine grasslands (páramo). *Geomorphology*, 73(3–4), 207–221. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.012>
- Cargua Catagña, F. E., Llerena, M. V. R., Carrión, D. A. D., Moreno, C. G. R., & Lima, G. P. S. (2017). Analytical methods comparison for soil organic carbon determination in Andean Forest of Sangay National Park-Ecuador. *Acta Agronomica*, 66(3), 408–413. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n3.52467>
- Cargua, F. E., Rodríguez, M. V., Recalde, C. G., & Vinueza, L. M. (2014). Cuantificación del Contenido de Carbono en una Plantación de Pino Insigne (*Pinus radiata*) y en Estrato de Páramo de Ozogoché Bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Informacion Tecnológica*, 25(3), 83–92. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000300011>
- Cargua, F., Rodríguez, M., Damián, D., Recalde, C., & Santillán, G. (2017). Analytical methods comparison for soil organic carbon determination in Andean Forest of Sangay National Park-Ecuador. *Acta Agronomica*, 66(3), 408–413. <https://doi.org/10.15446/acag.v66n3.52467>
- Chinchipe, Z. (2014). Cuantificación del carbono en los páramos del parque nacional Yacuri , provincias de Loja y, 4(1), 45–52.
- Chocobar, A., Cox, R. A., Fonteyne, S., Govaerts, B., Jaspers, N., & Kienle, F. (2013).

- Estabilidad de los agregados del suelo tamizando en humedo : guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo, 7. Retrieved from <https://repository.cimmyt.org/handle/10883/4033>
- Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos*, 287–304. <https://doi.org/10.1070/RC1998v067n01ABEH000368>
- Cueva, K., Añasco, M., Ordoñez, L., Salazar, X., Sánchez, G., Cisneros, C., & Segura, D. (2012). *Manual de Campo proyecto Evaluación Nacional Forestal*. (FAO, Ed.). Quito.
- Damian, D., Marquéz, C., García, V., Recalde, C., Rodríguez, M., & Ayala, J. (2017). Priorización de microcuencas en los Andes ecuatorianos usando parámetros morfométricos, WSA y GIS, 38–61.
- Daza, M., Hernández, F., & Triana, F. (2014). Efecto del Uso del Suelo en la Capacidad de Almacenamiento Hídrico en el Páramo de Sumapaz - Colombia, 67(20), 7189–7200.
- FAO. (2009). Guía para la descripción de suelos, *Cuarta edición*.
- Gabioud, E., Wilson, M., & Sasal, M. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos, 5(3100), 129–139.
- García, M., Marquez, C. O., & Lopez, R. (2010). Dinámica de agregados y su afectación por la deforestación de la selva nublada y su reemplazo por pastizal o cultivo, 54(1), 29–43.
- García, M., Márquez, O., & López, R. (2010). Dinámica de agregados y su afectación por la deforestación de la selva nublada y su reemplazo por pastizal o cultivo. *Revista Forestal Venezolana*, 54(1), 29–43.
- Harden, C. P., Hartsig, J., Farley, K. a., Lee, J., Bremer, L. L., Crespo, P., Cooper, M. (2013). Effects of Land-Use Change on Water in Andean Páramo Grassland Soils.
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., ... Cerra, M. (2014). Los Páramos Andinos. Retrieved from <https://goo.gl/8j2MdU>
- Hofstede, Robert, Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., ... Marcos, C. (2014). *¿ Qué Sabemos ?* Quito, Ecuador Derechos.
- Iniestra, D. J. M., Ramírez, M. F., Berenice, I., Arriaga, E., & López, J. (2013). Full-Text. *Terra Latinoamericana*, 201–210.
- Lefevre, C., Rekik, F., Alcantara, V., & Wiesel, L. (2017). *Carbono orgánico del suelo - el potencial Oculto*. Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la

*Agricultura - FAO.*

- Llambí, L. D., Soto-W, A., Célleri, R., De Bievre, B., Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. *Proyecto Páramo Andino*, (May), 284. [https://doi.org/10.1016/0164-1212\(88\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0164-1212(88)90045-3)
- Márquez, C., García, V., Schultz, R., & Isenhardt, T. (2019). A conceptual framework to study soil aggregate dynamics. *European Journal of Soil Science*. <https://doi.org/10.1111/ejss.12775>
- Márquez, C. O., Garcia, V. J., Cambardella, C. A., Schultz, R. C., & Isenhardt, T. M. (2004). Aggregate-Size Stability Distribution and Soil Stability. *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 725. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0725>
- Mcknight, J. Y. (2015). Linking soil moisture and carbon-cycle processes in two understudied terrestrial ecosystems : Ecuadorian páramo grasslands and constructed agricultural wetlands, 135.
- Minitab. (2016). *Getting Started with Minitab 17*. Minitab Inc.
- Naldini, M. (2016). *Efecto del cambio en el uso de la tierra sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo en el chaco seco, Argentina*.
- Pereira, C. (2015). Semana de la Ciencia y Tecnología Jornada de Puertas Abiertas INIA Tacuarembó 20 de mayo de 2015. *Inia*.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador, 42(2), 138–156.
- Rodríguez, M., Yunta, F., Guirado, M., Ortega, A., Cuevas, J., & Gumuzzio, J. (2017). Carbono orgánico en suelos forestales del Principado de Asturias: Importancia de los horizontes subsuperficiales e influencia de la fisionomía de la cubierta vegetal, (January 2018).
- Rodríguez, M., & Cargua, F. (2013). *“Elaboración de un inventario forestal multipropósito con énfasis en el contenido de carbono de las diferentes clases de uso de tierra, parroquia Achupallas, cantón Alausí, provincia de Chimborazo”*.
- Rodríguez, Marco, Damián, D., Santillán, G., Recalde, C., & Cargua, F. (2017). Forest biodiversity in Andean brow and its relation to the carbon content in the above-ground biomass, 66, 35–41.
- Teresa, M., Ortiz, B., Alfonso, E., & Araujo, R. (2016). Determination of stability of soil aggregates in different agroecosystems of the north Department of Santander, 46.

## 9. ANEXOS.

### 9.1. Densidad aparente, Humedad y pH del suelo bajo páramo, pasto y cultivo

Variable	ANOVA <i>p</i> Valor	Media Páramo	Media Pasto	Media Cultivo
Humedad	0,001	63,08 a	27,22 b	9,21 c
Densidad Aparente	0,001	0,58 a	1,12 b	1,43 c
pH	0,001	5,08 a	5,80 b	7,26 c

Medias expresadas en porcentaje (%); las letras a y b y c muestran la diferencia significativa entre los valores medios.

### 9.2. Proporción de agregados estables e inestables en agua en cada fracción de suelo bajo páramo, pasto y cultivo.

Variable	ANOVA Valor <i>p</i>	Media Páramo	Media Pasto	Media Cultivo	Comparación PÁRAMO vs. PASTO vs. CULTIVO
Fraccionamiento en seco (gr)					
>2000 $\mu\text{m}$	0.001	45.63 a	18.00b	15.47c	<b>PAR &gt; PAS&gt;CUL</b>
250–2000 $\mu\text{m}$	0.001	25.97 a	42.94b	26.76b	<b>PAS &gt; CUL&gt;PAR</b>
53–250 $\mu\text{m}$	0.001	25.95 a	32.19b	23.03c	<b>PAS &gt; PAR&gt;CUL</b>
<53 $\mu\text{m}$	0.001	2.193 a	6.22b	34.28c	<b>CUL &gt; PAR&gt;PAS</b>
Fraccionamiento en húmedo (gr)					
>2000 $\mu\text{m}$	0.001	71.41 a	19.57b	18.97b	<b>PAR &gt; PAS&gt;CUL</b>
250–2000 $\mu\text{m}$	0.001	23.45 a	44.16b	36.63b	<b>PAS &gt; CUL&gt;PAR</b>
53–250 $\mu\text{m}$	0.001	3.37 a	21.45b	21.10b	<b>PAS &gt; CUL&gt;PAR</b>
<53 $\mu\text{m}$	0.001	1.28 a	14.17b	22.61c	<b>CUL &gt; PAS&gt;PAR</b>

El texto en **negrita** indica significado al nivel de 0.05, NS indica que no es significativo si  $p > 0.05$ . Los agregados que sobreviven al impacto que provoca el agua se etiquetan como estables y los que no sobreviven se etiquetan como inestables.

### 9.3. Fase de campo

#### 9.3.1. Identificación de parcelas por conglomerados



Zona de Estudio (Páramo)



Zona de Estudio (Páramo)



Zona de Estudio (Cultivo)



Zona de Estudio (Pasto)



Identificación de conglomerados



Parcelas de muestreo del conglomerado

### 9.3.2. Recolección de Muestras



Desbroce en el punto de muestreo



Determinación de la profundidad del muestreo



Muestreo en suelos de páramo



Homogenización de la muestra



Muestreo en suelos de cultivo



Toma de muestra con el cilindro (Densidad)

#### 9.4. Fase de Laboratorio



Peso del suelo en un volumen conocido



Suelo seco para la determinación de DA.



Peso de la muestra 100 gr



Humedecimiento de la muestra (45 ml)



Fraccionamiento del suelo (Tamices)



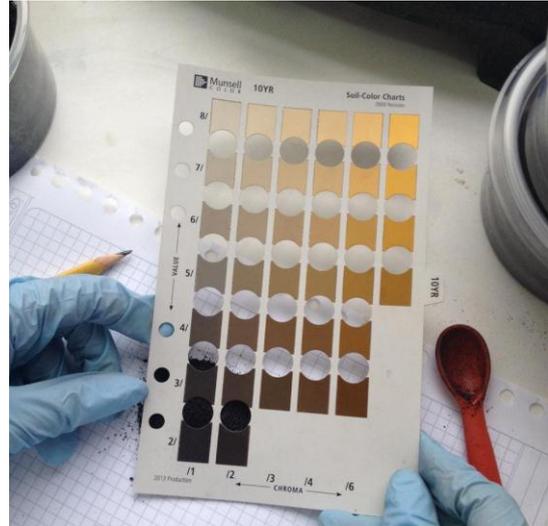
Secado de las fracciones de suelo en bandejas



Fracción de suelo seco (páramo)



Fracción de suelo seco (cultivo)



Determinación del color mediante la utilización de la tabla de Munsell



Determinación del pH



Peso de la muestra para determinar el carbono