



Universidad de Los Andes
Facultad de Ingeniería
Postgrado en Modelado y Simulación de Sistemas

**Validación del modelo de materia orgánica del
suelo MOMOS en ecosistemas venezolanos en un
gradiente altitudinal de 65 a 3968 m**

Autora

Ing. María Alejandra Rujano Castillo

alemary@ula.ve

Tutora

Dra. Magdiel Ablan

CESIMO, Facultad de Ingeniería

Co - Tutora

Dra. Lina Sarmiento

ICAE, Facultad de Ciencias

**Trabajo de grado presentado ante la ilustre Universidad de Los
Andes como requisito para optar al título de Magister Scientiarum en
Modelado y Simulación de Sistemas**

Octubre, 2009

A mi madre Bety

Por ser la mejor, por tu fe, amor y apoyo incondicional.

A mi hijo Jesús Miguel

Por ser la luz de mi vida, por tu nobleza, amor y sonrisa.

Gracias a ustedes por enseñarme a crecer, sin sus presencias nada tendría sentido...

Agradecimientos

Esta investigación se culminó satisfactoriamente gracias al apoyo, asesoría y amistad de las personas comprometidas con el desarrollo de este estudio; por eso deseo expresar mi sincero agradecimiento a:

La Dra. Lina Sarmiento del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) de la Universidad de Los Andes.

La Dra. Magdiel Ablan del Centro de Simulación y Modelos (CESIMO) de la Universidad de Los Andes.

AL Dr. Marc Pansu del Institut de Recherche pour le Developpement (IRD), Francia.

AL Dr. Yann Martineau de la Universidad de París XI, Francia.

La Geógrafa Julia Smith del Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE) de la Universidad de Los Andes.

Al Centro de Desarrollo Científico Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes, por el financiamiento otorgado para la realización de este estudio, bajo el N° I-1149-08-01-EM.

“La gratitud en silencio no sirve a nadie”

(G.B. Stern).

Validación del modelo de materia orgánica del suelo MOMOS en ecosistemas venezolanos en un gradiente altitudinal de 65 a 3968 m

Resumen

Utilizando los resultados de un experimento de descomposición de paja de trigo marcada con ^{14}C en un gradiente altitudinal se validó un modelo sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOMOS-6). Este experimento, realizado entre el periodo 1994-1997 en el marco de un proyecto de cooperación Venezuela-Francia, consistió en descomponer el material marcado en bolsitas con suelo enterradas a 5 cm, realizando muestreos periódicos para determinar el ^{14}C total y el ^{14}C de la biomasa microbiana (*BM*). MOMOS-6 simula la dinámica de descomposición de un sustrato en función de su calidad, considerando cinco compartimientos: necromasa lábil (*NL*), necromasa estable (*NS*), humus lábil (*HL*), humus estable (*HS*) y la *BM*. Las salidas de todos los compartimientos ocurren siguiendo una dinámica de primer orden y constituyen entradas al compartimiento de *BM*, el cual respira de acuerdo a un coeficiente metabólico que depende del parámetro k_{resp} y presenta una tasa de mortalidad que constituye la entrada al *HL*, el cual se transforma en *HS* a una tasa constante. Para calibrar MOMOS-6 se utilizaron datos climáticos de los seis sitios estudiados (El Vigía, 65 m; Barinas, 165 m; Tovar, 780 m; Santa Rosa, 1800 m; Gavidia, 3400 m y El Banco, 3968 m), con los cuales se calculó un factor combinado de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo que actúa sobre todas las tasas del modelo para considerar el efecto climático sobre la dinámica de la descomposición. Los resultados muestran que con un juego constante de parámetros para todos los suelos y considerando el efecto del clima, MOMOS-6 simula adecuadamente la descomposición del sustrato y la evolución de la *BM*. Únicamente el parámetro k_{resp} debe ser calibrado dependiendo de la textura de cada suelo, mostrándose la potencialidad de generalizar el uso de MOMOS-6 en una amplia gama de condiciones tropicales.

Índice General

	Pág.
Lista de Tablas	IX
Lista de Figuras	XII
Capítulo I: Introducción	16
1.1.- Planteamiento del problema.....	20
1.2.- Objetivos del estudio.....	21
1.2.1.- Objetivo general.....	21
1.2.2.- Objetivos específicos.....	21
1.3.- Justificación del estudio.....	22
1.4.- El proyecto Ecos-Nord.....	22
Capítulo II: Marco Referencial	25
2.1.- Bases teóricas.....	25
2.1.1.- Dinámica de sistemas.....	25
2.1.1.1.- Proceso de modelado.....	25
2.1.1.2.- Proceso de simulación.....	27
2.1.2.- Simulación ambiental.....	27
2.1.3.- La materia orgánica del suelo (MOS).....	28
2.1.4.- Modelos que simulan la dinámica de la materia orgánica del suelo.....	29
2.2.- Antecedentes.....	31
2.2.1.- Dinámica de la descomposición de un material vegetal estándar en un gradiente altitudinal (65 m – 3968 m) en los Andes tropicales.....	31
2.2.2.- Comparación de cinco modelos de descomposición de la materia orgánica del suelo usando datos de un experimento con trazadores isotópicos ¹⁴ C y ¹⁵ N en condiciones de campo.....	33
2.2.3.- Modelización de las transformaciones y del secuestro de la materia orgánica del suelo en dos ecosistemas contrastantes de los Andes.....	36

2.3.- Desarrollo conceptual del modelo MOMOS-6.....	37
2.3.1.- Necromasa (<i>NC</i>).....	37
2.3.2.- Biomasa microbiana (<i>MB</i>).....	37
2.3.3.- Humus (<i>H</i>).....	38
2.4.- Funcionamiento del modelo MOMOS-6.....	39
2.5.- Ecuaciones del modelo MOMOS-6.....	39
2.5.1.- Parámetros del modelo.....	39
2.5.2.- Variables de estado del modelo.....	40
2.6.- El modelo SAHEL.....	43
Capítulo III: Marco Metodológico.....	45
3.1.- Descripción del experimento de campo.....	45
3.1.1.- Los sitios de estudio.	45
3.1.1.1.- El Vigía.....	45
3.1.1.2.- Barinas.....	46
3.1.1.3.- Tovar.....	47
3.1.1.4.- Santa Rosa.....	47
3.1.1.5.- Gavidia.....	48
3.1.1.6.- El Banco.....	49
3.1.2.- El diseño experimental.....	51
3.2.- Obtención y tratamiento de la información climática.....	53
3.2.1- Grupo 1: Datos diarios disponibles para el periodo en estudio..	55
3.2.1.1.- El Vigía.....	55
3.2.1.2.-Barinas.....	55
3.2.1.3.- Santa Rosa.....	55
3.2.2.- Grupo 2: Sin datos diarios disponibles para el periodo de estudio y sin estación climática cercana.....	55
3.2.2.1.- El Banco.....	55
3.2.3.- Grupo 3: Con estación climática cercana pero con datos incompletos o ausentes para el periodo en estudio.....	57
3.2.3.1.- Tovar.....	57
3.2.3.2.- Gavidia.....	62

3.2.4.- Simulación de la precipitación a nivel diario.....	64
3.2.4.1- Simulador de lluvia markoviano.....	68
3.3.- Estimación de la humedad diaria del suelo.....	70
3.4.- Implementación del modelo MOMOS-6 en Vensim®.....	72
3.4.1.- Constantes de descomposición de la MOS.....	74
3.4.2.- Datos climáticos de entrada.....	75
3.4.3.- Función de respuesta al clima (f_{cor}).....	76
3.4.4.- Constante de respiración de la BM (k_{resp}).....	76
3.5.- Estrategia de validación del modelo MOMOS.....	77
3.6- Métodos estadísticos de evaluación para la validación del modelo MOMOS.....	78
3.6.1.- Porcentaje de la raíz del error cuadrático medio ($\%RMSE$).....	78
3.6.2.- Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NS).....	79
3.7.- Análisis de sensibilidad.....	80
3.8.- Aplicación del modelo MOMOS: Respuesta de la MOS a escenarios de cambio climático en Venezuela.....	81
3.8.1.- Cambios en los patrones de temperatura para el año 2060.....	83
3.8.2.- Cambios en los patrones de precipitación para el año 2060.....	83
Capítulo IV: Análisis de los Resultados	87
4.1.- Simulación de la precipitación diaria para Tovar y Gavidia.....	87
4.2.- Calibración del modelo SAHEL.....	89
4.3.- Cálculo de las funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo para el modelo MOMOS.....	98
4.3.1.- Función de respuesta a la temperatura f_t	98
4.3.2.- Función de respuesta a la humedad del suelo f_w	99
4.4.- Calibración de la tasa de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp}).....	102
4.5.- Validación del modelo MOMOS.....	106
4.6.- Aplicación del análisis de sensibilidad multivariable al modelo MOMOS.....	116
4.7.- Simulación de la respuesta de la MOS en los diferentes	

ecosistemas ante escenarios de cambio climático en Venezuela.....	118
Capítulo V: Conclusiones	125
Referencias	130

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Algunos modelos de simulación sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo.....	30
Tabla 2: Sitios considerados en el proyecto TRANSALT de descomposición de un material estándar en un gradiente altitudinal, indicando la altitud, duración de la incubación y periodo de estudio...	32
Tabla 3: Características de los modelos MOMOS Tipo I los cuales presentan constantes de velocidad y coeficientes de partición de los flujos.....	33
Tabla 4: Características de los modelos MOMOS Tipo II que presentan únicamente constantes de velocidad.....	35
Tabla 5: Parámetros cinéticos del modelo MOMOS-6 en día ⁻¹	39
Tabla 6: Datos físico-químicos del suelo para cada sitio de estudio....	50
Tabla 7: Regresiones simples entre la precipitación mensual de Tovar y las estaciones cercanas Zea la Florida y el Mesón, $n=24$, el asterisco indica que la regresión es significativa a $p<0.05$ y NS que no es significativa.....	58
Tabla 8: Regresiones múltiples entre la precipitación mensual de Tovar y las estaciones cercanas Zea la Florida y el Mesón, $n=24$, el asterisco indica que la regresión es significativa a $p<0.05$	60
Tabla 9: Promedios mensuales de precipitación para Tovar calculados a partir de regresiones simples o múltiples con las estaciones cercanas de Zea La Florida y el Mesón, en función de la disponibilidad de datos en las diferentes estaciones para cada mes..	61
Tabla 10: Información de entrada del modelo SAHEL.....	71
Tabla 11: Constantes de descomposición en día ⁻¹ de los distintos compartimientos de la MOS utilizadas en el modelo MOMOS.....	75
Tabla 12: Flujos entre los compartimientos del modelo MOMOS en g C/kg*día.....	75

Tabla 13: Funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo.....	76
Tabla 14: Valoración del estadístico $\%RMSE$	79
Tabla 15: Escenarios de cambio climático en Venezuela.....	82
Tabla 16: Valores del $\%RMSE$ de las corridas seleccionadas para Tovar y Gavidia.....	88
Tabla 17: Parámetros a calibrar del modelo SAHEL.....	89
Tabla 18: Parámetros calibrados del modelo SAHEL que permiten el mejor ajuste entre el agua simulada en la primera capa del suelo (0-10 cm) y los valores de humedad medidos en las bolsitas de descomposición.....	90
Tabla 19: Evaluación de la bondad de ajuste entre los datos de humedad del suelo simulados para la primera capa (0-10 cm) por el modelo SAHEL y los datos medidos en campo utilizando como indicadores $\%RMSE$ y NS en los seis sitios bajo estudio.....	91
Tabla 20: Valores promedios de la función de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo durante todo el periodo del experimento de campo.....	101
Tabla 21: Valores calibrados de la constante de respiración microbiana (k_{resp}) para cada sitio de estudio, manteniendo los valores de los otros parámetros según Pansu et al., (2004), considerando los datos medidos de carbono total remanente y de carbono en la biomasa microbiana.....	102
Tabla 22: Evaluación de la bondad de ajuste entre los valores simulados por el modelo MOMOS y los datos medidos en campo utilizando el $\%RMSE$ y el NS para el C_{total} y el C_{BM}	109
Tabla 23: Valores del índice de sensibilidad de los compartimientos con respecto a cambios de $\pm 10\%$ en los parámetros del modelo MOMOS en el sitio Santa Rosa. Cálculos realizados para el último día de la simulación (2.6 años).....	117
Tabla 24: Influencia del cambio climático propuesto en el escenario	

pesimista para el año 2060 sobre las funciones de respuesta a la temperatura f_t , a la humedad del suelo f_w y la función combinada $f_t * f_w$	119
Tabla 25: Valores de entrada anual de necromasa (paja de trigo) al suelo que serían necesarios para alcanzar una materia orgánica total del suelo equivalente a la encontrada en cada sitio suponiendo una situación de equilibrio.....	122
Tabla 26: Tamaño de algunos compartimientos de carbono del suelo sin cambio climático y después de 64 años de cambio climático para los seis sitios considerando que la entrada de necromasa al suelo no se ve afectada por el cambio climático.....	123
Tabla 27: Cambio neto y porcentual en el tamaño de algunos compartimientos de carbono en el suelo luego de 64 años de simulación.....	124

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Dinámica del CO ₂ y la temperatura media del planeta.....	16
Figura 2: Reservorios globales de carbono para 1990.....	17
Figura 3: Funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo, que permiten ajustar las tasas de descomposición del modelo en función de estas variables climáticas.....	42
Figura 4: Vegetación natural de selva húmeda tropical y climadiagrama de El Vigía.....	46
Figura 5: Vegetación natural de sabana estacional y climadiagrama de Barinas.....	46
Figura 6: Vegetación natural de bosque semicaducifolio y climadiagrama de Tovar.....	47
Figura 7: Vegetación natural de selva nublada y climadiagrama de Santa Rosa.....	48
Figura 8: Vegetación de páramo andino y climadiagrama de Gavidia.....	48
Figura 9: Vegetación del páramo altiandino y climadiagrama de El Banco.....	49
Figura 10: Mapa de ubicación de los sitios de estudio.....	50
Figura 11: Carbono marcado de la biomasa microbiana medido en las bolsitas de descomposición para los sitios de estudio.....	52
Figura 12: Carbono total marcado medido en las bolsitas de descomposición para los sitios de estudio.....	52
Figura 13: Humedad del suelo medida en las bolsitas de descomposición para los sitios de estudio.....	53
Figura 14: Esquema sobre la obtención y tratamiento de la precipitación y la temperatura.....	54
Figura 15: Mapa de isoyetas de precipitación en la cuenca alta del río Chama.....	56

Figura 16: Promedios mensuales de precipitación para Tovar medidos o calculados a partir de las estaciones Zea la Florida y el Mesón.....	62
Figura 17: Promedios mensuales de precipitación para Gavidia calculados a partir de las estaciones Mucuchíes y Mucubají.....	63
Figura 18: Mapa de ubicación de las estaciones climáticas por cada sitio de estudio.....	64
Figura 19: Funcionamiento del simulador de lluvia markoviano.....	65
Figura 20: Diagrama de flujo del simulador de lluvia markoviano.....	68
Figura 21: Acoplamiento de los modelos SAHEL y MOMOS.....	70
Figura 22: Esquema del modelo MOMOS-6 reproducido en el software Vensim®	73
Figura 23: Esquema de validación del modelo MOMOS.....	77
Figura 24: Representación esquemática del signo de cambio de la precipitación, según los modelos UKTR y CCC–EQ.....	84
Figura 25: Gráfico temporal e histograma de frecuencia de la precipitación diaria generada para Tovar.....	87
Figura 26: Gráfico temporal e histograma de frecuencia de la precipitación diaria generada para Gavidia.....	88
Figura 27: Humedad del suelo simulada para El Vigía con el modelo SAHEL previamente calibrado.....	92
Figura 28: Humedad del suelo simulada para Barinas con el modelo SAHEL previamente calibrado.....	93
Figura 29: Humedad del suelo simulada para Tovar con el modelo SAHEL previamente calibrado.....	94
Figura 30: Humedad del suelo simulada para Santa Rosa con el modelo SAHEL previamente calibrado.....	95
Figura 31: Humedad del suelo simulada para Gavidia con el modelo SAHEL previamente calibrado.....	96
Figura 32: Humedad del suelo simulada para el Banco con el modelo SAHEL previamente calibrado.....	97

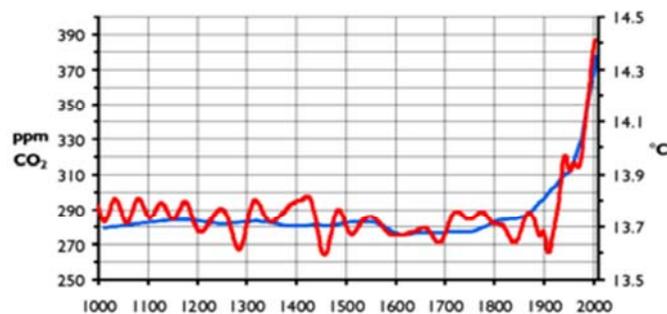
Figura 33: Valores diarios de la función de respuesta a la temperatura f_t en los seis sitios de estudio durante el periodo de incubación de la paja marcada.....	99
Figura 34: Valores diarios de la función de respuesta a la humedad del suelo f_w en los seis sitios de estudio, durante el periodo de incubación de la paja marcada.....	100
Figura 35: Valores diarios de la función de respuesta al clima en los seis sitios de estudio, durante el intervalo de incubación.....	101
Figura 36: Relación de la constante de respiración microbiana (k_{resp}) con la textura del suelo (arcilla+limo) utilizando los valores de los seis sitios de estudio.....	103
Figura 37: Relación entre la constante de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp}) y el pH del suelo en los seis sitios de estudio.....	105
Figura 38: Simulación por el modelo MOMOS del C_{total} y datos medidos en el experimento de campo. Se muestra el promedio y la desviación estándar de las cuatro réplicas de campo para cada muestreo.....	107
Figura 39: Simulación por el modelo MOMOS del C_{BM} y datos medidos en el experimento de campo. Se muestra el promedio y la desviación estándar de las cuatro réplicas de campo para cada muestreo.....	108
Figura 40: Valoración global de los diez valores medidos en el experimento de campo y los valores simulados que corresponden al tiempo en el que se realizaron las mediciones para el C_{total} de los seis sitios estudiados.....	111
Figura 41: Valoración global de los diez valores medidos en el experimento de campo y los valores simulados que corresponden al tiempo en el que se realizaron las mediciones para el C_{BM} de los seis sitios estudiados.....	112
Figura 42: Simulación de la dinámica del carbono en los diferentes compartimientos del suelo para los seis sitios de estudio.....	113

Figura 43: Dinámica de respiración de la biomasa microbiana por cada sitio en g C/kg*día.....	116
Figura 44: Dinámica diaria de la función de respuesta combinada a la temperatura y a la humedad del suelo $f_t * f_w$ con cambio y sin cambio climático para cada sitio de estudio.....	118
Figura 45: Dinámica del carbono total después de incorporar una cantidad de necromasa al suelo igual a la utilizada en el experimento de campo en condiciones con cambio y sin cambio climático para cada sitio de estudio.....	121

Capítulo I: Introducción

En la actualidad, la actividad humana conlleva la liberación a la atmósfera de diversos gases que modifican su composición química, lo que está produciendo un cambio climático de forma acelerada. Se trata de un fenómeno desigual que conduce a un aumento de la temperatura en los polos y en las regiones continentales, denominado calentamiento global. Se predice, a partir de proyecciones basadas en simulaciones computacionales, un mayor calentamiento en el futuro. Las simulaciones parecen indicar que la principal causa de este cambio climático global es el aumento de las emisiones de dióxido de carbono y otros gases que aumentan el calor de la superficie y de la parte baja de la atmósfera, al aumentar el llamado efecto invernadero, ocasionando que se evapore más agua de los océanos (Martón, 2008).

En la figura 1, se muestra la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera terrestre y la temperatura media global, en los últimos 1000 años. Puede verse como la temperatura se mantuvo relativamente estable hasta principios de 1800, a partir de aquí y coincidiendo con la revolución industrial, comienza a aumentar sistemáticamente.



CO₂ en la atmósfera terrestre (ppm) — Temperatura media global (°C)

Figura 1: Dinámica del CO₂ y la temperatura media del planeta.

Tomado de: http://es.wikipedia.org/wiki/Calentamiento_global.

Con el aumento de la temperatura, se afecta en gran medida el almacenamiento de carbono en el suelo y en la vegetación, ya que se acelera la mineralización, los nutrientes son liberados más rápidamente y la acumulación de la materia orgánica del suelo (MOS) se reduce. Esta materia orgánica está ampliamente reconocida como reservorio de nutrientes para las plantas y el mayor factor de estabilización de la estructura edáfica. Es un componente clave del suelo que afecta sus propiedades químicas, físicas y biológicas, constituyendo un pre-requisito para la obtención de cultivos con niveles de producción elevados y estables (Andriulo, 2006).

Una de las funciones más importantes de la MOS es actuar como reservorio de carbono, representando más del doble del carbono contenido en la atmósfera, como se muestra en la figura 2, siendo sólo superado por los reservorios geológicos y por el carbono disuelto en las aguas oceánicas (Woomer y Swift, 1994).

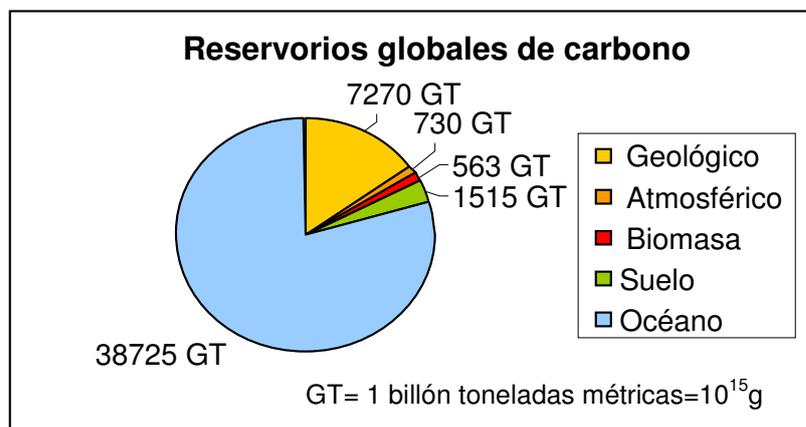


Figura 2: Reservorios globales de carbono para 1990 (Woomer y Swift, 1994).

Los cambios que experimente esta materia orgánica pueden tener un impacto en el equilibrio global, existiendo dos factores antrópicos importantes que están alterando la tasa natural de intercambio de

carbono entre la atmósfera y la biosfera terrestre en sus procesos de fotosíntesis, respiración, descomposición y combustión: el cambio de uso de la tierra y la quema de combustibles fósiles (IPCC, 2000).

El objetivo del presente estudio es validar el modelo MOMOS (Micro-Organismos y Materia Orgánica del Suelo) creado por Pansu et al., (2004), con el cual se simula la dinámica del carbono del suelo, centrándose en el funcionamiento de los microorganismos descomponedores como los principales responsables de los procesos metabólicos que producen los cambios de esta materia orgánica. La validación se realizará en diferentes ambientes venezolanos ubicados en un gradiente altitudinal entre 60 y 4000 m, incluyendo ambientes de selva húmeda tropical, sabana estacional, selva semicaducifolia de montaña, selva nublada, páramo andino y páramo altiandino. Esta gama de ambientes con condiciones contrastantes permite validar en un amplio espectro de situaciones tanto de clima como de suelo. Finalmente, una vez validado, el modelo MOMOS se utilizará para predecir las consecuencias del cambio climático sobre los reservorios lábiles y estables de carbono en el suelo.

El modelo MOMOS es el eje principal del programa de cooperación inter-universitario PCU/Ecos Nord, integrado por instituciones e investigadores de Venezuela y Francia, que buscan modelizar la materia orgánica en ecosistemas de Venezuela y aplicar los modelos a la gestión de la fertilidad y evaluación del efecto del cambio global. El presente estudio está inserto dentro de este programa de cooperación binacional.

La estructura de este estudio, es como sigue.

Capítulo I: Introducción. Presenta el tema a investigar, haciendo referencia al planteamiento del problema, objetivos del estudio, justificación y una breve descripción del proyecto Ecos-Nord; para dar una

visión general del objeto a estudiar y destacando los aspectos más relevantes del mismo.

Capítulo II: Marco Referencial. Describe la estructura sobre la cual se diseña el estudio, de acuerdo con las bases teóricas y antecedentes, dándose una descripción general de los aspectos más importantes del estudio, con el fin de familiarizar al lector con algunos términos específicos y técnicos.

Capítulo III: Marco Metodológico. Define los pasos y procedimientos a seguir para alcanzar los objetivos de la investigación. Estos pasos, son: descripción del experimento de campo, obtención y tratamiento de la información climática, estimación de la humedad diaria del suelo, implementación del modelo MOMOS-6 en Vensim[®], estrategia de validación del modelo MOMOS, métodos estadísticos de evaluación para la validación del modelo MOMOS, análisis de sensibilidad y la aplicación del modelo MOMOS, los cuales determinan el análisis necesario para llegar a las conclusiones.

Capítulo IV: Análisis de los Resultados. Incluye la presentación de los resultados de las simulaciones y su confrontación con los resultados experimentales, en el contexto de las bases teóricas y los antecedentes. Estos resultados se dividieron en: simulación de la precipitación diaria para Tovar y Gavidia, calibración del modelo SAHEL, cálculo de las funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo para el modelo MOMOS, calibración de la tasa de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp}), validación del modelo MOMOS, aplicación del análisis de sensibilidad multivariable al modelo MOMOS y la simulación de la respuesta de la MOS en los diferentes ecosistemas ante escenarios de cambio climático en Venezuela, los cuales permiten explicar y comparar los resultados obtenidos con la teoría para así hallar las conclusiones.

Capítulo V: Conclusiones. Presenta las discusiones finales, haciendo una breve recapitulación sobre los resultados de la validación del modelo MOMOS en un gradiente altitudinal.

1.1.- Planteamiento del problema

El modelo MOMOS-6 ha sido calibrado y validado para dos ecosistemas de alta montaña tropical, el Páramo de Gavidia en Venezuela y la Puna de Patacamaya en Bolivia (Pansu et al., 2006) dentro de un proyecto internacional centrado en el estudio de estos sistemas de altitud. Sin embargo, se plantea la necesidad de ampliar su uso, generando una estructura genérica del modelo, llamado MOMOS, que pueda ser aplicada a otros ecosistemas tropicales con diferentes características de clima y suelo, para predecir las consecuencias del cambio climático sobre los reservorios lábiles y estables del carbono en el suelo, en una amplia gama de condiciones tropicales.

Este planteamiento es posible ya que se tiene acceso a los resultados de un experimento de campo, en el cual se incubó durante 1.5 a 3 años un material vegetal (paja de trigo) marcado con ^{14}C en seis sitios que cubrían un amplio gradiente altitudinal andino entre 60 y 4000 m de altitud, incluyendo ambientes de selva húmeda tropical (El Vigía), sabana estacional (Barinas), selva semicaducifolia de montaña (Tovar), selva nublada (Santa Rosa), páramo andino (Gavidia) y páramo altiandino (El Banco). La duración del experimento fue aumentando con la altura, desde 1.5 años en los sitios más bajos hasta 3 años en los más altos, debido a que la descomposición es más lenta a medida que desciende la temperatura (Coûteaux et al., 2001).

Los trazadores isotópicos, como el ^{14}C y ^{15}N , permiten seguir la pista de elementos como carbono, azufre, nitrógeno, oxígeno e hidrógeno en plantas, suelos, agua y atmósfera. Generalmente, sus aplicaciones se

han centrado en estudios de ecología (ciclos biogeoquímicos, cadenas tróficas y contaminantes) y paleontología, ya que son muy valiosos para interpretar algunos procesos geológicos y ambientales (Abdala, 2000). En este caso particular, el trazador ^{14}C permite seguir la descomposición del material agregado una vez que el mismo es mezclado con el suelo y enterrado, ya que estima el tiempo de residencia de la materia orgánica y sus fracciones en el suelo.

1.2.- Objetivos del estudio

1.2.1.- Objetivo general

Validar el modelo de descomposición de la materia orgánica del suelo MOMOS para seis ecosistemas con condiciones ecológicas contrastantes, ubicados en un gradiente altitudinal de 65 m a 3968 m, como una herramienta para predecir la dinámica de la MOS en una amplia gama de condiciones tropicales, tanto de baja altitud como de montaña.

1.2.2.- Objetivos específicos

1. Recolectar y evaluar la información climática disponible para los seis sitios de estudio y utilizarla para el cálculo de las funciones de respuesta de la descomposición a la temperatura y la humedad del suelo. En caso de información faltante o incompleta, generar esta información de acuerdo a las posibilidades para cada sitio.
2. Utilizar el modelo SAHEL (Soils in semi-Arid Habitats that Easily Leach, Penning de Vries et al., 1989) de balance hídrico ecosistémico, para generar los datos diarios de humedad del suelo requeridos por el modelo MOMOS, calibrando dicho modelo con la

información disponible y analizando la calidad de los resultados obtenidos.

3. Validar el modelo MOMOS utilizando las funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo, considerando también el efecto de las propiedades del suelo sobre la dinámica de la descomposición de la materia orgánica del suelo. Analizar el comportamiento del modelo MOMOS a través de un análisis de sensibilidad.
4. Realizar un ejercicio de simulación utilizando el modelo MOMOS, para analizar la dinámica de la MOS ante escenarios de cambio climático en los sitios de estudio.

1.3.- Justificación del estudio

El modelo MOMOS puede ser una herramienta computacional de gran utilidad para simular la dinámica de la MOS bajo diferentes condiciones, por ejemplo, el efecto de un cambio de temperatura, de régimen pluviométrico o de uso del suelo. Sin embargo, se requiere una validación previa del mismo, bajo una amplia gama de condiciones climáticas y tipos de suelo, para poder generalizar su uso. La propuesta es realizar esta validación utilizando información de un experimento previo, para evaluar si el modelo es realmente generalizable. Adicionalmente, una vez validado y si los resultados resultan satisfactorios, se propone realizar un ejercicio de simulación, para analizar las consecuencias en diversos ecosistemas venezolanos, de los cambios climáticos más frecuentes que están ocurriendo o que son esperados en el futuro.

1.4.- El proyecto Ecos-Nord

El programa de cooperación inter-universitario Ecos-Nord entre Venezuela y Francia, lleva por título: “Modelización de la materia orgánica

del suelo en ecosistemas venezolanos y su aplicación a la gestión de la fertilidad y al secuestro de carbono”, está coordinado respectivamente por el ICAE (Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas de la ULA) y el IRD (Institut de Recherche pour le Developpement de Francia), el cual busca el intercambio científico y la formación de recursos humanos en torno a la temática del mismo.

Esta cooperación bilateral comienza formalmente en 1989, pero en la actualidad se quiere utilizar nuevamente la información colectada en proyectos anteriores para generalizar el uso de un modelo de simulación de la dinámica de la materia orgánica del suelo (MOMOS) en diferentes ecosistemas venezolanos. Entre los participantes venezolanos de este proyecto se encuentran tanto investigadores como estudiantes de Maestría y Doctorado de diferentes postgrados. Así mismo, en la red de instituciones que participan en el proyecto, se encuentran por Venezuela tres dependencias de la Universidad de los Andes: el Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE), el Centro de Simulación y Modelos (CESIMO) y el Departamento de Química. Participan así mismo, el Laboratorio de Biogeoquímica de la Universidad Simón Rodríguez, el Instituto de Edafología de la Universidad Central de Venezuela y el Instituto de Zoología Tropical de la misma universidad. Este proyecto comprende tres fases a desarrollar:

Primera fase. Se utilizarán datos disponibles de un experimento donde se incubó material marcado con ^{14}C y ^{15}N en un gradiente altitudinal de 60 a 4000 m, para calibrar y validar el modelo MOMOS acoplado con el modelo SAHEL.

Segunda fase. Se acoplará el modelo MOMOS con el modelo FAPROM que simula la dinámica de la vegetación y la producción de necromasa aérea y subterránea en sucesiones vegetales (Martineau y Saugier, 2006)

o con otros modelos de producción vegetal, para generalizar la predicción robusta del ciclo del carbono y del nitrógeno en distintos ecosistemas venezolanos.

Tercera fase. Esta fase tendrá como objetivo espacializar la herramienta de modelización obtenida, utilizando bases de datos de clima y suelo, gestionadas por sistemas de información geográfica (SIG).

El presente estudio se enmarca dentro de la primera fase del proyecto Ecos-Nord, ya que se quiere extender la aplicación del modelo MOMOS, inicialmente desarrollado y calibrado con información del páramo, a otros ecosistemas y tipos de ambientes del trópico, como una herramienta útil en la predicción de la dinámica del carbono del suelo, tanto para el manejo de agroecosistemas como para la evaluación de escenarios de cambio climático (Sarmiento, 2004).

Capítulo II: Marco Referencial

2.1.- Bases teóricas

2.1.1.- Dinámica de sistemas

La Dinámica de Sistemas (DS) fue desarrollada por Jay Forrester a principios de la década de 1960. Es una herramienta de modelado y simulación que permite representar sistemas y simular sus comportamientos pasados y futuros. Un sistema es una percepción de la realidad que el simulador quiere representar, ésta puede ser diferente dependiendo de los fines que desee satisfacer. Una vez definido el sistema se construye un modelo que reproduzca su comportamiento global mediante el funcionamiento interrelacionado de los mecanismos parciales que lo componen, para así disponer de una herramienta que permita simular el impacto de distintas estrategias sobre las variables de interés (Aracil, 1995).

2.1.1.1.- Proceso de modelado

El proceso de modelado consiste en el conjunto de operaciones mediante el cual, tras el oportuno estudio y análisis, se construye el modelo del aspecto de la realidad que nos resulta problemático. Este proceso consiste, en analizar toda la información de la que se dispone con relación al proceso, depurarla hasta reducirla a sus aspectos esenciales para que pueda ser transcrita al lenguaje sistémico (Aracil, 1995). En el proceso de modelado se pueden distinguir las siguientes fases.

- **Definición del problema.** En esta primera fase se trata de definir claramente el problema y de establecer si es adecuado para ser descrito.

- **Conceptualización del sistema.** Se definen los distintos elementos que integran la descripción del problema, así como las influencias que se producen entre ellos. El resultado de esta fase es el establecimiento del diagrama de influencias del sistema.
- **Formalización.** Se utiliza el diagrama de influencias de la fase anterior, para establecer un diagrama de Forrester, el cual es una representación simbólica de las variables de nivel, flujo y auxiliares de un diagrama causal, lo que constituye un paso intermedio entre el diagrama causal y el sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden que le corresponde. A partir de este diagrama se pueden escribir las ecuaciones del modelo. Al final de la fase se dispone de un modelo del sistema programado en un computador.
- **Comportamiento del modelo.** Esta cuarta fase consiste en la simulación informática del modelo para determinar las trayectorias que genera.
- **Evaluación del modelo.** En esta fase se somete el modelo a una serie de ensayos y análisis para evaluar su validez y calidad. Estos análisis son muy variados y comprenden desde la comprobación de la consistencia lógica de las hipótesis que se incorporan hasta el estudio del ajuste entre las trayectorias generadas por el modelo y las registradas en la realidad. Así mismo, se incluye un análisis de sensibilidad que permite evaluar el efecto de diferentes parámetros y la solidez de las conclusiones que se extraigan del mismo, con relación a los valores numéricos de los parámetros que incorpora o las hipótesis estructurales.
- **Aplicación del modelo.** En esta última fase el modelo se emplea para analizar políticas alternativas que pueden aplicarse al sistema

que se está estudiando. Estas políticas alternativas se definen normalmente mediante escenarios que representan las situaciones a las que debe enfrentarse el usuario del modelo (Aracil, 1995).

2.1.1.2.- Proceso de simulación

Un modelo matemático emplea algún tipo de formalismo matemático para expresar relaciones, proposiciones sustantivas de hechos, variables, parámetros, entidades y relaciones entre variables, para estudiar comportamientos de sistemas complejos ante situaciones difíciles de observar en la realidad.

Para reproducir el comportamiento del sistema real modelado a través de un conjunto de ecuaciones, es necesario procesarlas con la ayuda de la informática. Este proceso recibe la denominación de simulación informática del sistema y requiere de herramientas informáticas adecuadas. Para nuestro estudio se usará el software Vensim[®], el cual es una herramienta visual de modelaje que permite conceptualizar, documentar, simular, analizar y optimizar modelos de dinámica de sistemas. Vensim[®] provee una forma simple y flexible de construir modelos de simulación, sean lazos causales o diagramas de stock y de flujo (Diagramas de Forrester) (Aracil, 1995).

2.1.2.- Simulación ambiental

Los modelos ambientales evalúan el ambiente y los impactos sobre el mismo debido a la influencia humana, lo que permite a los investigadores interactuar con políticas a nivel local, regional, nacional e internacional. La evolución de estos modelos ha crecido de manera significativa desde 1950, lo que refleja la evolución conceptual de las técnicas de modelización, los avances tecnológicos en computación, los avances

científicos en respuesta a la creciente necesidad de sistemas de estudio (especialmente medio ambientales) de una manera integrada y una mayor demanda de extrapolación (especialmente la predicción) en el espacio y el tiempo.

La simulación ambiental se ha convertido en una poderosa herramienta en la predicción de fenómenos ambientales, ya que le permite a los científicos comprender las interacciones entre el medio ambiente, los ecosistemas, las poblaciones de seres humanos y animales. Este alcance es cada vez más importante en el cuidado del medio ambiente (control y gestión) y en el desarrollo de medios sostenibles para la dependencia humana (Wainwright y Mulligan, 2004).

2.1.3.- La materia orgánica del suelo (MOS)

La materia orgánica del suelo (MOS) es un elemento clave dentro de los ecosistemas naturales, por su efecto en las propiedades bioquímicas, físicas y químicas del suelo y en el crecimiento de las plantas (Magdoff y Weil, 2004).

Cualquier residuo animal o vegetal es materia orgánica pero cuando está sin descomponer se denomina necromasa. Durante el proceso de descomposición de la necromasa, los compuestos más resistentes tienden a acumularse y a su vez se sintetizan nuevos compuestos resultando en la formación de un material complejo, el humus, más resistente a la descomposición microbiana, que la necromasa o tejido original a partir del cual se formó (Swift et al., 1979).

Este proceso, conocido como humificación, ocurre conjuntamente con la descomposición de los residuos y es llevado a cabo por los microorganismos del suelo, los cuales conforman la biomasa microbiana que, si bien representa una fracción pequeña de la materia orgánica del

suelo, tiene un rol muy importante como agente de descomposición de residuos orgánicos, liberando en este proceso nutrientes al suelo, CO₂ a la atmósfera y sintetizando humus (Swift et al., 1979).

Por otro lado, se ha documentado que en general los sistemas de cultivo disminuyen la materia orgánica del suelo (MOS), especialmente en sistemas de manejo que acentúan la erosión y conducen a la disminución de la fertilidad de los suelos (Woomer y Swift, 1994; Magdoff y Weil, 2004). En suelos arcillosos se retiene más MOS que en suelos arenosos debido a que las arcillas actúan protegiendo físicamente la MOS de la acción de los organismos descomponedores (Magdoff y Weil, 2004).

Así mismo, el conocimiento de la dinámica de la materia orgánica del suelo es esencial para entender el flujo del carbono (C) y nitrógeno (N) en el suelo y entre éste y la atmósfera. Sin embargo, la cantidad y calidad de los aportes orgánicos al suelo en forma tanto de abonos orgánicos como de residuos de cultivos generan diferencias sustanciales en el tamaño de los distintos compartimientos orgánicos en el suelo y en las constantes de mineralización del C y N (Matus y Maire, 2000).

2.1.4.- Modelos que simulan la dinámica de la materia orgánica del suelo

Existen una variedad de modelos que simulan la mineralización de la materia orgánica del suelo, la humificación y el secuestro de carbono; los cuales se comenzaron a publicar a partir de la década de los 80 y se caracterizan por dividir la materia orgánica del suelo en diferentes compartimientos incluyendo por lo general los residuos de plantas, la biomasa microbiana y el humus (Shaffer et al., 2001).

En algunos modelos las transformaciones entre los compartimientos se describen por cinéticas de primer orden y las constantes de velocidad se modifican dependiendo de la temperatura, humedad, pH, contenido de

arcilla en el suelo, además de los mecanismos e hipótesis que llevan a las transformaciones de dichos compartimientos. Algunos de estos modelos se mencionan en la tabla 1, con su respectivo autor y año de creación.

Modelos sobre la Materia Orgánica del Suelo	Autor	Año
Modelo NC SOIL (Nitrogen and carbon transformation in soil)	Molina et al.,	1983
Modelo CENTURY	Parton et al.,	1987
Modelo VERBERNE	Verberne	1990
Modelo DAISY	Hansen	1991
Modelo MOMOS-C (Model Matter Organic Soil Carbon)	Sallih y Pansu	1993
Modelo DNDC (DeNitrification DeComposition)	Li	1994
Modelo CANDY (Carbon and nitrogen dynamics)	Franko	1995
Modelo RothC (Rothamsted carbon model)	Coleman y Jenkinson	1996
Modelo SOMM (Soil organic matter mineralization)	Chertov y Komarov	1997

Tabla 1: Algunos modelos de simulación sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo (Shibu et al., 2006).

El modelo MOMOS-C es un antecedente directo del modelo MOMOS-6, desarrollado por Pansu et al., (2004) que utilizaremos en el presente estudio.

Si bien éste no es el espacio para realizar una comparación de los diferentes modelos, las principales diferencias entre los mismos se encuentran en el número y tipo de compartimientos que consideran, el rol que atribuyen a la biomasa microbiana como agente de la descomposición, el tipo de funciones de respuesta a los factores del ambiente y el tipo de parámetros que usan. Para una comparación entre los mismos ver por ejemplo (Shaffer et al., 2001; Shibu et al., 2006). La principal particularidad del modelo que se utilizará en este estudio, tal como explicaremos en detalle más adelante, es que la biomasa microbiana es considerada como el compartimiento central del modelo, responsable de la mayor parte de las transformaciones de carbono.

2.2.- Antecedentes

Varios estudios realizados por investigadores venezolanos y franceses en ecosistemas venezolanos, evidencian la influencia de variables tales como: tipo de suelo, régimen de temperatura y humedad, cantidad y calidad de los residuos vegetales incorporados, sobre la dinámica de la MOS, lo que servirá de base para ampliar el uso del modelo MOMOS en un gradiente altitudinal. A continuación se presenta un breve resumen de estos trabajos, como los antecedentes más directos del presente estudio:

2.2.1.- Dinámica de la descomposición de un material vegetal estándar en un gradiente altitudinal (65 m – 3968 m) en los Andes tropicales (Coûteaux et al., 2001)

Esta publicación presenta resultados de un proyecto de cooperación Venezuela-Francia conocido con el nombre de TRANSALT. Se estudia la incubación de un material vegetal (paja de trigo) marcado con ^{14}C y ^{15}N durante 1.5 a 3 años en seis sitios (El Vigía, Barinas, Tovar, Mérida, Gavidia, El Banco), incluyendo ambientes de selva húmeda tropical, sabana estacional, selva semicaducifolia de montaña, selva nublada, páramo andino y páramo altiandino, para determinar la contribución del clima (temperatura y humedad) y otros factores (propiedades del suelo) sobre la mineralización del carbono. La utilización de paja de trigo como material estándar, permite comparar directamente la descomposición de un material de calidad uniforme y evaluar sólo el efecto del clima y del suelo. Por otra parte la utilización de material marcado con ^{14}C , permite distinguir el C proveniente de la paja que proviene del suelo y evaluar así la tasa de descomposición. Este trabajo constituye posiblemente el estudio de descomposición realizado en el gradiente altitudinal más amplio. El experimento consistió en colocar la paja marcada mezclada con el suelo de cada sitio en bolsitas de descomposición enterradas a 5

cm de profundidad. Se realizaron 10 muestreos a lo largo del tiempo con 4 réplicas por muestreo, es decir, por cada sitio de estudio, se analizaron 40 muestras. En cada muestreo se hicieron mediciones del carbono marcado total remanente, lo que permitió monitorear la descomposición del residuo.

En la tabla 2, se muestran los periodos de estudio correspondientes al tiempo de muestreo por cada sitio estudiado.

Sitios	Altitud	Años	Periodo
El Vigía	65 m	1.5	05-12-1994 al 10-06-1996
Barinas	165 m	1.5	06-12-1994 al 11-06-1996
Tovar	780 m	2	01-12-1994 al 03-12-1996
Santa Rosa	1800 m	2.6	30-11-1994 al 01-07-1997
Gavidia	3400 m	3.2	23-11-1994 al 13-01-1998
El Banco	3968 m	3.2	02-12-1994 al 13-01-1998

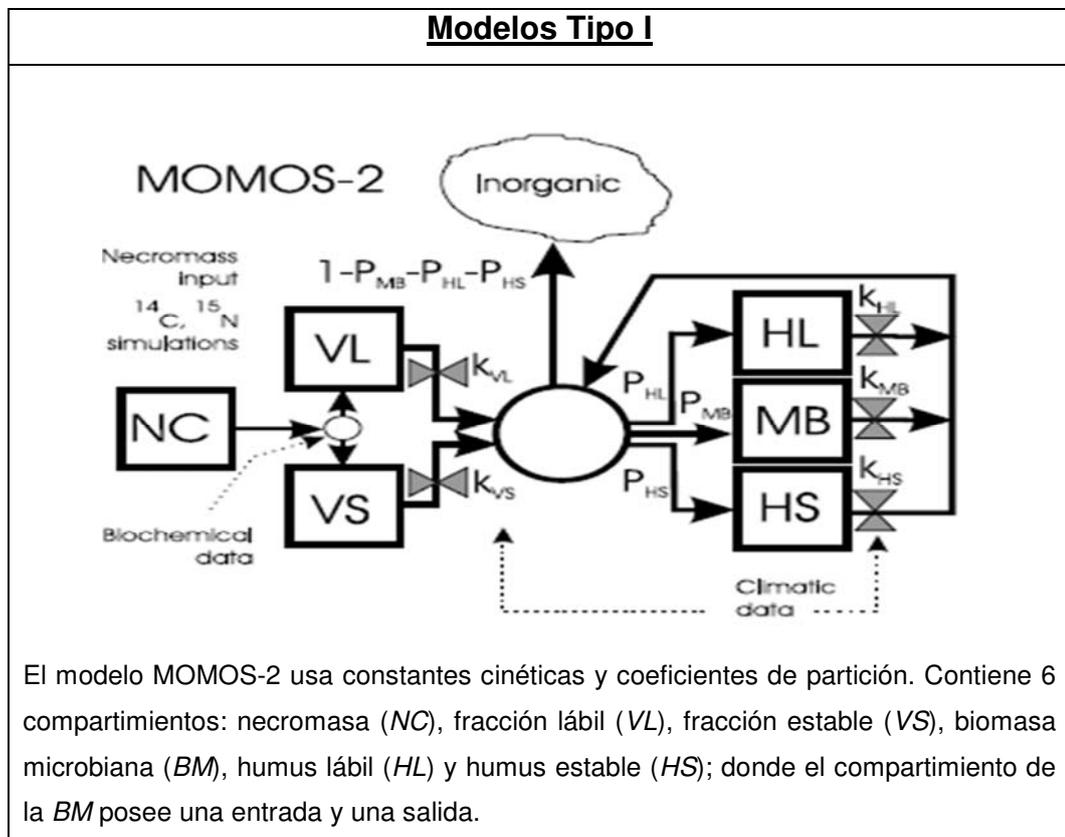
Tabla 2: Sitios considerados en el proyecto TRANSALT de descomposición de un material estándar en un gradiente altitudinal, indicando la altitud, duración de la incubación y periodo de estudio (Coûteaux et al., 2001).

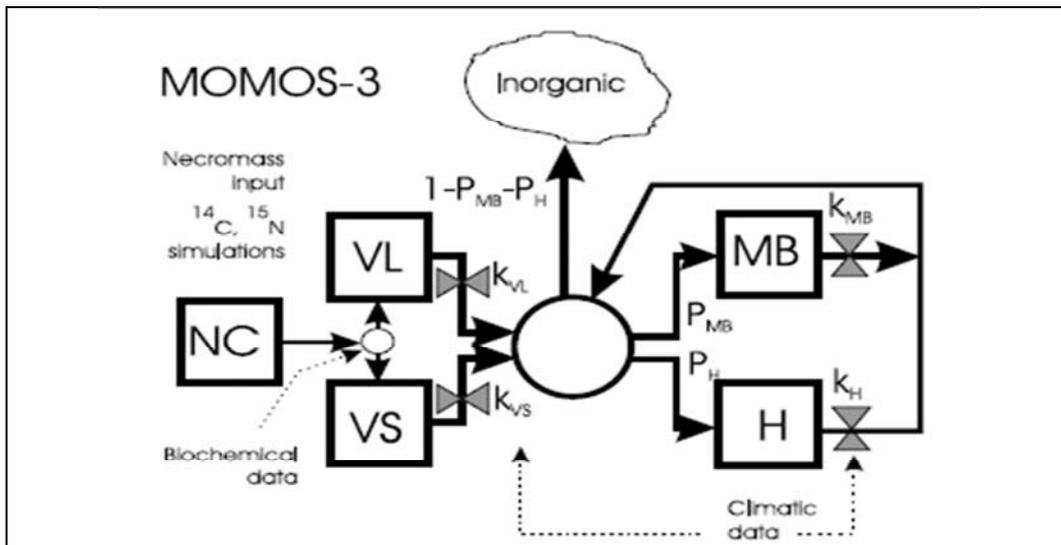
Los resultados obtenidos muestran que la descomposición del material marcado en el suelo no está determinada únicamente por las condiciones de temperatura y humedad sino que otros factores actúan ya sea desestabilizando la MOS, como en el caso de la sabana, o bien estabilizándola, como en el caso de los ecosistemas de altitud.

La información del proyecto TRANSALT, incluyendo otros datos no presentados en el artículo de Coûteaux et al., (2001), como la biomasa microbiana marcada y el contenido de agua en el suelo, se utilizará en el presente estudio para validar el modelo MOMOS.

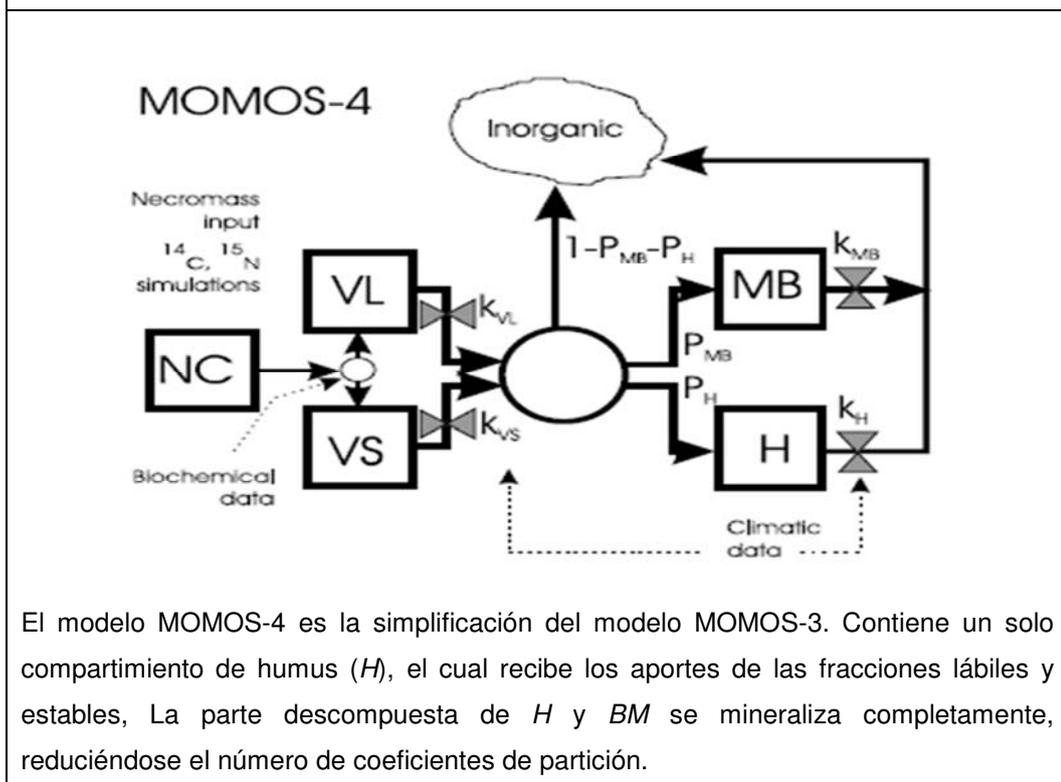
2.2.2.- Comparación de cinco modelos de descomposición de la materia orgánica del suelo usando datos de un experimento con trazadores isotópicos ^{14}C y ^{15}N en condiciones de campo (Pansu et al., 2004)

Este estudio evalúa cinco modelos, MOMOS-2 a MOMOS-6, que predicen la dinámica del carbono (C) y del nitrógeno (N) en el suelo durante la descomposición de la necromasa en base a diferentes hipótesis y niveles de complejidad. Se utiliza datos de un experimento de incubación de material marcado con ^{14}C y ^{15}N durante dos años en un ecosistema de alta montaña en Venezuela (Páramo de Gavidia) que se obtuvieron en el marco de un proyecto internacional denominado TROPANDES. Las cinco versiones del modelo MOMOS se sometieron a un análisis de sensibilidad y se dividieron en dos grupos, como se muestran en las tablas 3 y 4.



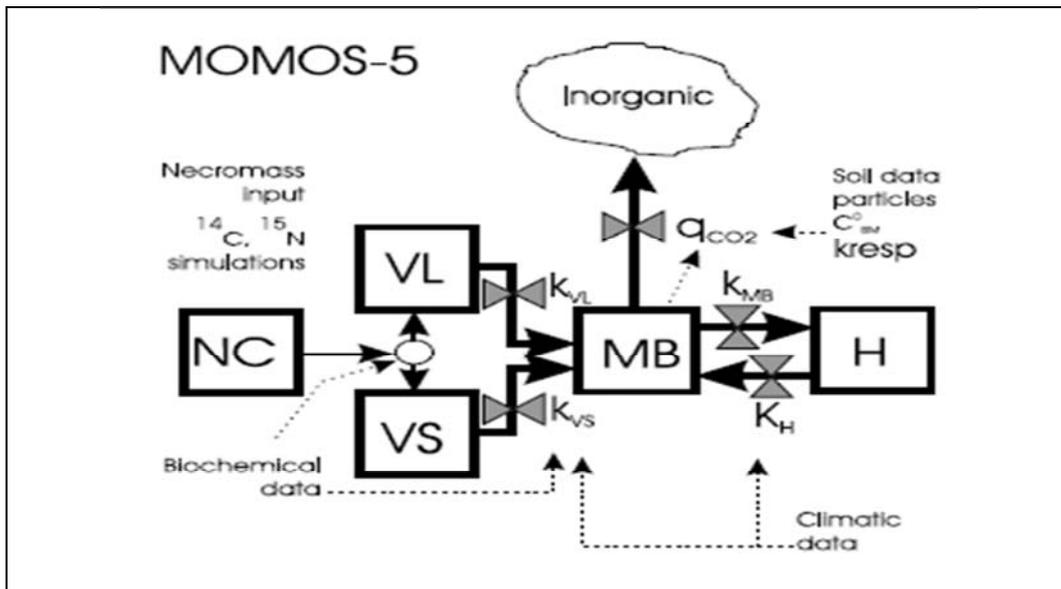


El modelo MOMOS-3 es la simplificación del modelo MOMOS-2. Contiene un solo compartimiento de humus (H) y al igual que el anterior posee coeficientes de partición que distribuyen los aportes de la descomposición a los diferentes compartimientos.

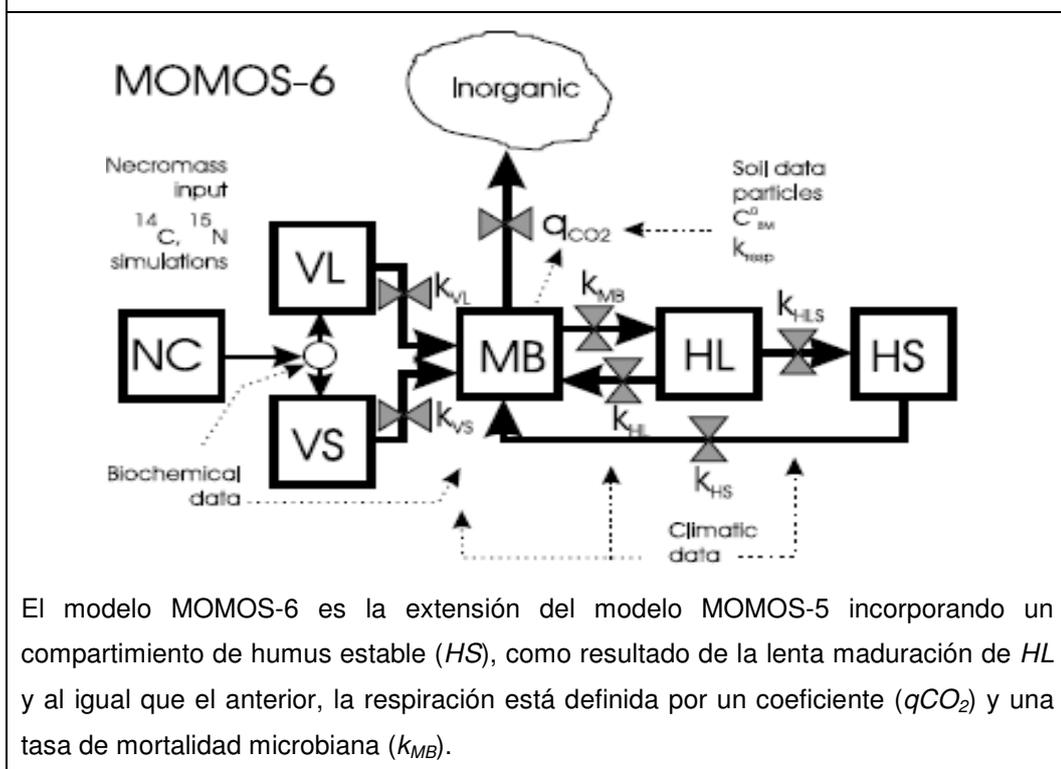


El modelo MOMOS-4 es la simplificación del modelo MOMOS-3. Contiene un solo compartimiento de humus (H), el cual recibe los aportes de las fracciones lábiles y estables, La parte descompuesta de H y BM se mineraliza completamente, reduciéndose el número de coeficientes de partición.

Tabla 3: Características de los modelos MOMOS Tipo I los cuales presentan constantes de velocidad y coeficientes de partición de los flujos (Pansu et al., 2004).



El modelo MOMOS-5 usa sólo constantes cinéticas, eliminándose los coeficientes de partición y la *BM* es el compartimiento central, que regula todas las transformaciones. Posee tres entradas (*VL*, *VS*, *H*) y dos salidas (*H*, respiración). La respiración está definida por un coeficiente (q_{CO_2}) y una tasa de mortalidad microbiana (k_{MB}).



El modelo MOMOS-6 es la extensión del modelo MOMOS-5 incorporando un compartimiento de humus estable (*HS*), como resultado de la lenta maduración de *HL* y al igual que el anterior, la respiración está definida por un coeficiente (q_{CO_2}) y una tasa de mortalidad microbiana (k_{MB}).

Tabla 4: Características de los modelos MOMOS Tipo II que presentan únicamente constantes de velocidad (Pansu et al., 2004).

El modelo MOMOS-6, según Pansu et al., (2004), es el que mejor predice la descomposición de la MOS a largo plazo, por lo que se hace necesario validarlo en un amplio espectro de condiciones ambientales, lo que constituye el centro de nuestro trabajo de investigación.

2.2.3.- Modelización de las transformaciones y del secuestro de la materia orgánica del suelo en dos ecosistemas contrastantes de los Andes (Pansu et al., 2006)

Continuando con los estudios de dinámica de la materia orgánica en ecosistemas tropicales de altitud, en este trabajo los autores utilizan información de un experimento realizado en la Puna de Patacamaya (Bolivia, 3789 m de altitud), caracterizada por un clima muy seco y en el Páramo de Gavidia (Venezuela, 3400 m de altitud), con un clima también de alta montaña pero más húmedo, realizados también en el marco del proyecto TROPANDES. Ambos sitios son parecidos en términos de altitud, bajas temperaturas y uso de la tierra, pero diferentes en cuanto al contenido de MOS, precipitación y propiedades físicas del suelo. Al igual que en los experimentos descritos anteriormente, el ^{14}C y ^{15}N total remanentes y de la biomasa microbiana fueron medidos por dos años, así como la humedad del suelo y datos meteorológicos. La información proveniente del páramo de Gavidia, se utilizó para calibrar el modelo MOMOS-6 tal como fue explicado por Pansu et al., (2004). Al aplicar el modelo MOMOS-6 al sitio de Puna, sólo el coeficiente de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp}) fue re-estimado. La dinámica del ^{14}C y ^{15}N fueron diferentes en los dos sistemas, pero se lograron ser simuladas correctamente en ambos casos utilizando la información meteorológica de cada sitio y los mismos parámetros a excepción de K_{resp} . En la Puna, los procesos de transformación se detienen durante los largos periodos secos, sin embargo, la mineralización anual total es más importante que en el Páramo. Los cambios en los valores de k_{resp} permiten predecir que

la cantidad de carbono y nitrógeno secuestrado en el compartimiento de humus estable es más grande en el Páramo que en la Puna.

De este artículo se obtuvo la hipótesis de que el modelo MOMOS-6 puede ser utilizado en diferentes suelos, variando únicamente el valor de k_{resp} , hipótesis que someteremos a prueba en este estudio utilizando información de seis sitios diferentes.

2.3.- Desarrollo conceptual del modelo MOMOS-6

El modelo MOMOS-6 (Micro-Organismos y Materia Orgánica del Suelo) describe la dinámica de la materia orgánica del suelo, simulando el crecimiento, respiración y mortalidad de los microorganismos del suelo, como principales impulsores de la transformación y mineralización de los sustratos orgánicos. Este modelo fue el que mejor se ajustó a los datos de descomposición de un material doblemente marcado con ^{14}C y ^{15}N en un experimento realizado durante dos años en el páramo de Gavidia (Pansu et al., 2004).

La característica más importante de este modelo es que coloca a la biomasa microbiana (*BM*) en el centro, como único compartimiento vivo que respira y es responsable de todas las transferencias de carbono. A continuación se describen los compartimientos del modelo.

2.3.1.- Necromasa (NC). Está formada por residuos sin transformar de plantas y animales. Se divide en dos tipos: La fracción lábil (*VL*), formada por moléculas de fácil descomposición, como azúcares, proteínas y polisacáridos y la fracción estable (*VS*), formada por moléculas de difícil descomposición, como lignina y hemicelulosa (Herrera et al., 2001).

2.3.2.- Biomasa microbiana (MB). Es la principal responsable de la descomposición de los residuos orgánicos, del ciclado de nutrientes y del flujo de energía dentro del sistema. Este compartimiento está formado

principalmente por bacterias y hongos descomponedores, que utilizan la necromasa y el humus como fuente de energía, liberando CO₂ a la atmosfera (Lavelle y Spain, 2005).

2.3.3.- Humus (H). Son las sustancias orgánicas de color pardo y negruzco, que resultan de la descomposición de la necromasa. Su composición química es compleja, con alta proporción de su carbono en forma de estructuras aromáticas de gran estabilidad y lenta descomposición, esta fracción se asocia a los constituyentes minerales del suelo formando complejos órgano-minerales (Lavelle y Spain, 2005). Durante la evolución de la materia orgánica en el suelo se distinguen dos fases: la humificación y la mineralización.

La humificación es una fase bastante rápida, durante la cual los microorganismos del suelo actúan sobre la materia orgánica. Primero se forma el humus joven, de evolución rápida, que a su vez da paso al humus estable. Ambos productos forman la llamada MOS. Al humus joven también se le llama lábil (*HL*), porque todavía no está fijado o ligado a las partículas del suelo, sino simplemente mezclado con ellas, tiene una relación carbono-nitrógeno superior a 15 y es objeto de una intensa actividad microbiana y se le puede considerar como un componente fundamental de la fertilidad del suelo. En promedio se estima que constituye entre el 20-25% del humus total. El humus estable (*HS*), es la materia orgánica ligada al suelo, es decir, sólidamente fijada a los agregados de color oscuro. Su composición es muy compleja (húmina, ácidos húmicos y fúlvicos) y tiene una relación carbono-nitrógeno entre 9-10 y representa en promedio el 75-80% del humus total (Julca et al., 2006).

La mineralización del humus estable es muy lenta (1 al 2% al año), liberando así los minerales que luego absorberán las plantas. La intensidad del proceso de mineralización es afectada por numerosos

factores, siendo los más importantes: la cantidad y calidad del sustrato orgánico, la temperatura y la humedad del suelo (Julca et al., 2006).

2.4.- Funcionamiento del modelo MOMOS-6

El proceso de descomposición de la MOS comienza con la entrada de necromasa al sistema, la cual se divide en dos fracciones, lábil y estable, dependiendo de la calidad de la misma. Estos residuos son transformados por acción de los organismos descomponedores quienes los incorporan en su biomasa, los transforman en nuevos productos orgánicos (humus) o los mineralizan (CO_2). La dinámica con la que ocurren estos procesos está determinada por una serie de coeficientes (constantes de velocidad) además de factores climáticos como la temperatura y la humedad del suelo.

2.5.- Ecuaciones del modelo MOMOS-6

2.5.1.- Parámetros del modelo. Son constantes de velocidad que regulan las transferencias entre los compartimientos siguiendo una dinámica de primer orden y tienen unidades de día^{-1} , las cuales se ven afectadas por la acción de factores climáticos, como la temperatura y la humedad del suelo. En la tabla 5 se muestra este grupo de parámetros.

Constantes	Definición
k_{vl}	Constante de descomposición de la VL
k_{vs}	Constante de descomposición de la VS
k_{MB}	Constante de humificación a partir de la BM
k_{hl}	Constante de descomposición del HL
k_{hs}	Constante de descomposición del HS
k_{hls}	Constante de humificación del HL al HS
k_{resp}	Constante de respiración de la BM

Tabla 5: Parámetros cinéticos del modelo MOMOS-6 en día^{-1} (Pansu et al., 2004).

2.5.2.- Variables de estado del modelo. Vienen dadas por los cinco compartimientos del modelo en gramos de carbono por kilogramo de suelo ($\text{g C}\cdot\text{kg}^{-1}$). La variable NC no constituye un compartimiento, sino que es la cantidad de necromasa que entra al sistema, la cual es distribuida entre los compartimientos, VL y VS . Las condiciones iniciales de los compartimientos del modelo, cuando se utiliza para simular la descomposición de un material marcado sin considerar la materia orgánica pre-existente en el mismo, vienen dadas por las ecuaciones 2.1.

$$\begin{aligned}
 VL(0) &= (1 - fs) * C_o; \\
 VS(0) &= fs * C_o; \\
 MB(0) &= 0; \\
 HL(0) &= 0; \\
 HS(0) &= 0;
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

donde, fs es la fracción estable (valores 0-1) y C_o es el carbono inicial de la necromasa. Los valores iniciales de los compartimientos MB , HL y HS se colocan en cero ya que se considera que inicialmente el material marcado consiste únicamente en necromasa. De igual manera, se muestran en las ecuaciones 2.2, las ecuaciones generales del sistema, que corresponden a las variables de estado del modelo.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{VL}: & \text{ Necromasa lábil, } dVL/dt = -K_{vl} * VL \\
 \mathbf{VS}: & \text{ Necromasa estable, } dVS/dt = -K_{vs} * VS \\
 \mathbf{MB}: & \text{ Biomasa microbiana, } dBM/dt = K_{vl} * VL + K_{vs} * VS + K_{hl} * HL + K_{hs} * HS - K_{BM} * BM - qCO_2 * BM \\
 \mathbf{HL}: & \text{ Humus lábil, } dHL/dt = K_{BM} * BM - K_{hl} * HL - K_{hls} * HL \\
 \mathbf{HS}: & \text{ Humus estable, } dHS/dt = K_{hls} * HL - K_{hs} * HS
 \end{aligned}
 \tag{2.2}$$

El coeficiente metabólico de respiración de la biomasa microbiana qCO_2 ($\text{g C/kg}\cdot\text{día}$), viene dado por la ecuación 2.3.

$$qCO_2 = K_{resp} * (BM / C_{BM}^o) \quad (2.3)$$

donde, K_{resp} es la constante de respiración de la biomasa microbiana y C_{BM}^o es el carbono de la biomasa microbiana en estado de equilibrio. Esta ecuación depende de la cantidad de BM , ya que aumenta a medida que crece la BM (dependiendo del aporte inicial de la necromasa lábil y estable) y decrece a medida que disminuyen los microorganismos.

La ecuación 2.3 es la única ecuación no lineal del modelo y constituye uno de los principales aportes del trabajo de Pansu et al., (2004), pues permite que después de un aporte de necromasa al suelo el coeficiente respiratorio de la BM aumente y retorne lentamente a un valor basal a medida que el sustrato agregado va descomponiéndose y agotándose.

De esta forma se simula la estimulación de la actividad microbiana por la adición de un sustrato. Cuanto más sustrato se agregue y menor sea su fracción estable (f_s) mayor será el valor de qCO_2 .

Luego, las ecuaciones 2.2 están regidas por dos funciones de respuesta, una a la temperatura f_t y otra a la humedad del suelo f_w , como factores ambientales que afectan la velocidad de descomposición de la materia orgánica del suelo.

Ambas funciones de respuesta varían en un intervalo entre [0,1] como se muestran en la figura 3.

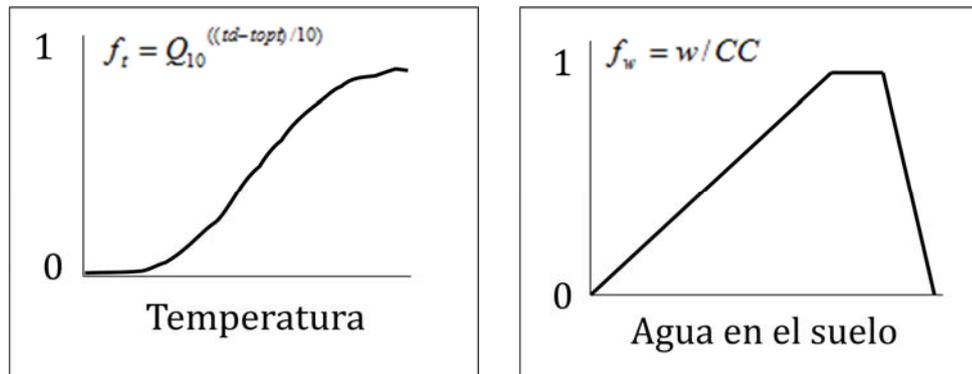


Figura 3: Funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo, que permiten ajustar las tasas de descomposición del modelo en función de estas variables climáticas (Proyecto TRANSALT).

La función de respuesta a la temperatura f_t es igual a un factor Q_{10} elevado a la diferencia entre la temperatura diaria del aire td ($^{\circ}\text{C}$) y la temperatura óptima $topt$ ($^{\circ}\text{C}$) para la descomposición. Q_{10} es el aumento de la tasa de mineralización, cuando aumenta la temperatura en 10°C . En esta función se observa que a 0°C la descomposición es muy limitada y esta limitación disminuye a medida que aumenta la temperatura. Por encima de la temperatura óptima del aire (28°C) no hay limitaciones para la descomposición y el factor se hace 1.

De igual manera, la función de respuesta a la humedad del suelo f_w es igual a la humedad diaria del suelo w (cm^3/cm^3) entre la capacidad de campo del suelo CC (cm^3/cm^3). Es una función lineal que indica que al aumentar el contenido de agua aumenta el contenido de la MOS. La humedad del suelo se acerca a 1 a medida que se acerca a la capacidad de campo. La humedad del suelo, necesaria para calcular esta función de respuesta, es calculada utilizando el modelo SAHEL de balance hídrico ecosistémico.

2.6.- El modelo SAHEL

El modelo SAHEL (Soils in semi-Arid Habitats that Easily Leach) fue desarrollado por Penning de Vries et al., (1989) y posteriormente implementado en la herramienta de dinámica de sistemas Vensim[®] por Metselaar (2003), en el marco del Proyecto TROPANDES. Es un modelo de balance hídrico que considera los procesos de intercepción, escorrentía, infiltración, evaporación, transpiración y drenaje con un enfoque de “tipping bucket”. El perfil del suelo se divide en capas, cada una con espesores y características de retención de agua distintas, incluyendo una capa superior de hojarasca. El espesor de la hojarasca y las características físicas de cada capa, son información de entrada al modelo, además de datos climáticos como temperatura y precipitación. La entrada y salida de agua de cada capa se simula a nivel diario. La capacidad de campo es el parámetro que determina el mayor contenido de agua que puede tener una capa y aquella que exceda este límite drena a la siguiente capa o sale por drenaje desde la última capa hacia fuera del perfil (Penning de Vries et al., 1989).

El modelo SAHEL, tal y como fue implementado en Vensim[®] por Metselaar (2003), utiliza dos métodos alternativos para calcular la evapotranspiración potencial (*ETP*), el método de Hargreaves y el de Penman-Monteith.

Para nuestro estudio, se usó el método de Hargreaves, ya que presenta menos requerimientos de datos. Este método es sencillo porque utiliza principalmente información de temperatura máxima y mínima y se calcula a través de la ecuación 2.4.

$$ETP = ET_o * K_c \quad (2.4)$$

donde, ET_o es la evotranspiración de referencia (mm/día) y K_c es el coeficiente de cultivo o coeficiente específico de cada tipo de vegetación. Esta evotranspiración de referencia se calcula a través de la ecuación 2.5.

$$ET_o = 0.0023 * Ra * (T + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (2.5)$$

donde, Ra es la radiación extraterrestre ($MJ/m^{-2} \cdot dia^{-1}$) que depende de la latitud y del día del año; T , T_{max} y T_{min} representan el valor medio, máximo y mínimo de la temperatura del aire ($^{\circ}C$), respectivamente (Trezza, 2008).

Capítulo III: Marco Metodológico

3.1.- Descripción del experimento de campo

3.1.1.- Los sitios de estudio

La información que se utilizará para la ampliación del modelo MOMOS a diferentes ecosistemas venezolanos proviene de un experimento de incubación *in situ* realizado en seis sitios a lo largo de una transecta altitudinal en el marco del proyecto TRANSALT de cooperación bilateral entre Venezuela y Francia.

Estos sitios se caracterizan por el contraste en sus condiciones de temperatura, precipitación anual, su distribución estacional y características del suelo. A continuación, se describen brevemente los sitios con sus características de clima y suelo.

3.1.1.1.- El Vigía. Es el sitio más bajo, situado a 65 m de altitud, al oeste del estado Mérida, se caracteriza por un clima húmedo tropical, sin una pronunciada estación seca. Su precipitación promedio anual es de 1826 mm y su temperatura promedio anual de 27.4 °C, como se muestra en la figura 4. La vegetación original es de selva húmeda tropical, pero ha sido recientemente deforestada y ahora es usado para la ganadería y la agricultura. El suelo es un Inceptisol, con un 67% de arena, es el más ácido de los sitios de baja altitud y su capacidad de retención de agua es de 31,15% (Coûteaux et al., 2001).

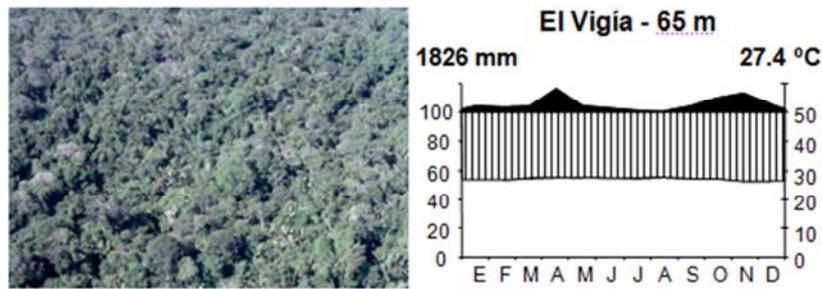


Figura 4: Vegetación natural de selva húmeda tropical y climadiagrama de El Vigía (Proyecto TRANSALT).

3.1.1.2.- Barinas. Es otro sitio de baja altitud que se encuentra a 165 m, localizado en la parte sur occidental de Venezuela, se caracteriza por tener un clima estacional, con una pronunciada estación seca (diciembre a marzo). Posee una precipitación promedio anual de 1462 mm y una temperatura promedio anual de 26.4 °C, como se muestra en la figura 5. La vegetación natural es de sabana estacional, dominada por gramíneas y árboles aislados. El suelo es un Alfisol, caracterizado por una gran cantidad de arena, baja cantidad de carbono y baja capacidad de retención de agua, en comparación al resto de los sitios de estudio (Coûteaux et al., 2001).

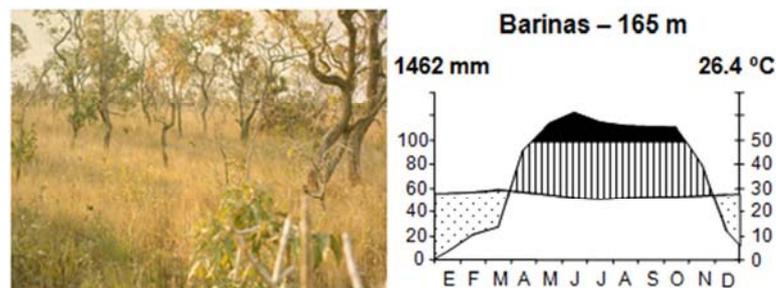


Figura 5: Vegetación natural de sabana estacional y climadiagrama de Barinas (Proyecto TRANSALT).

3.1.1.3.- Tovar. Se encuentra en la parte suroeste del estado Mérida, a 780 m de altitud, se caracteriza por un clima estacional de montaña, con cuatro meses secos al año. La precipitación promedio anual es de 1112 mm y la temperatura promedio anual de 23 °C, como se muestra en la figura 6. La vegetación natural es de selva estacional montana, dominada por árboles semidecíduos, la cual se ha convertido en plantaciones de café y potreros. El suelo es un Molisol, siendo el menos ácido de los sitios, posee un 62% de fracción fina y cerca del 5% de carbono orgánico (Coûteaux et al., 2001).

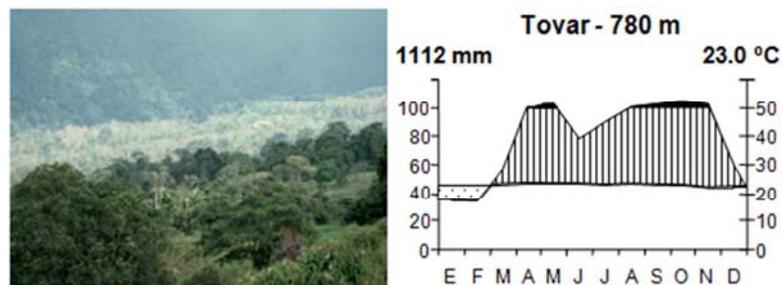


Figura 6: Vegetación natural de bosque semicaducifolio y climadiagrama de Tovar (Proyecto TRANSALT).

3.1.1.4.- Santa Rosa. A 1800 m snm de altitud, está situada en la parte central del estado Mérida, con un clima caracterizado por altas precipitaciones, sin un pronunciado periodo seco, alta nubosidad, baja insolación y alta humedad relativa. Posee una precipitación promedio anual de 1992 mm y una temperatura promedio anual de 17.4 °C, como se muestra en la figura 7. Su vegetación natural es de selva nublada. El suelo es un Inceptisol, cuyo contenido de materia orgánica es el más alto de los seis sitios. Este suelo es el más fértil en términos de capacidad de intercambio catiónico, con una textura similar a la de El Vigía. La capacidad de retención de agua es la más alta de los sitios de estudio. (Coûteaux et al., 2001).

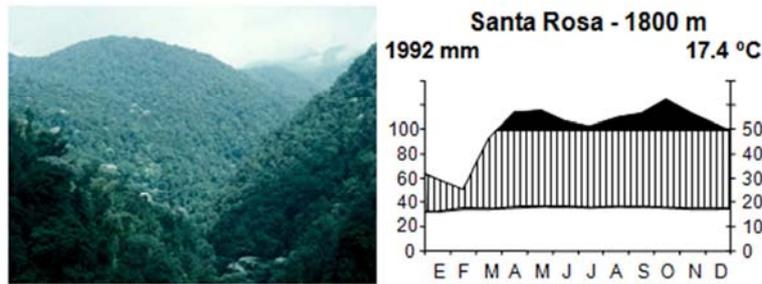


Figura 7: Vegetación natural de selva nublada y climadiagrama de Santa Rosa (Proyecto TRANSALT).

3.1.1.5.- Gavidia. Ubicada a 3400 m de altitud, con un clima característico de alta montaña tropical donde las heladas nocturnas están concentradas en la época seca, entre noviembre y marzo. Se localiza al este del estado Mérida. Posee una precipitación promedio anual de 1505 mm y una temperatura promedio anual de 8.9 °C, como se muestra en la figura 8. La vegetación natural es de páramo andino, dominada por rosetas gigantes de *Espeletia schultzii* (frailejón), entre otras especies. El suelo es un Inceptisol caracterizado por tener una textura fina y el pH más bajo de los sitios de estudio, con interesantes propiedades agronómicas en términos de retención de agua y capacidad de intercambio catiónico (Coûteaux et al., 2001).

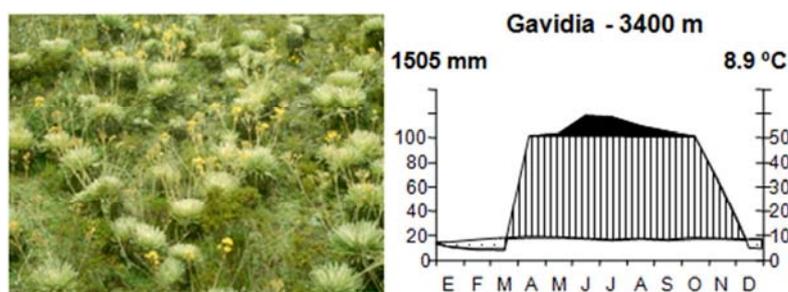


Figura 8: Vegetación de páramo andino y climadiagrama de Gavidia (Proyecto TRANSALT).

3.1.1.6.- El Banco. Es el sitio más alto, situado a 3968 m de altitud al noreste del estado Mérida, con un clima tropical de altura caracterizado por heladas frecuentes durante todo el año. Con una precipitación anual de 790 mm y una temperatura promedio anual de 5.5 °C es el sitio más seco del estudio, como se muestra en la figura 9. Su vegetación natural está dominada por rosetas de *Espeletia schultzei* y arbustos de *Hypericum laricoides*. El suelo es un Entisol, donde la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de retención de agua, es la más baja de los sitios de montaña (Coûteaux et al., 2001).

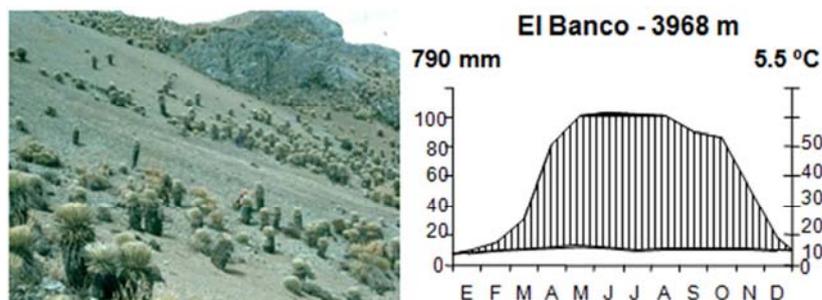


Figura 9: Vegetación del páramo altiandino y climadiagrama de El Banco (Proyecto TRANSALT).

En tabla 6, se muestran los datos físico-químicos del suelo para los seis sitios. Puede observarse una amplia variación en las distintas variables, con un *pH* que varía entre 6,1 y 4,6; el carbono orgánico (*C*) entre 11,3 % y 1,9%; la arena entre 77% y 40%; el limo entre 42% y 14%; la arcilla entre 18% y 5,3%, la capacidad de campo (*CC*) entre 42,8% y 10,8% y el punto de marchitamiento permanente (*PMP*) entre 36% y 7,5%, lo que permite evaluar el efecto del tipo de suelo sobre la dinámica de la descomposición.

Sitios	pH	C (%)	Arena (%DW)	Limo (%DW)	Arcilla (%DW)	CC (%DW)	PMP (%DW)
Vigía	5,1	2,9	67,3	24,0	8,7	31,2	17,2
Barinas	5,7	1,9	77,0	14,0	9,0	10,8	7,5
Tovar	6,1	4,3	62,0	31,3	6,7	28,1	19,2
Santa Rosa	5,2	11,3	69,3	25,3	5,3	42,8	36,0
Gavidia	4,6	9,6	40,0	42,0	18,0	40,7	20,8
Banco	4,7	4,7	62,0	30,0	8,0	25,8	11,0

Tabla 6: Datos físico-químicos del suelo para cada sitio de estudio (Coûteaux et al., 2001).

Finalmente, en la figura 10 se aprecia un mapa topográfico con la ubicación de los seis sitios de estudio.

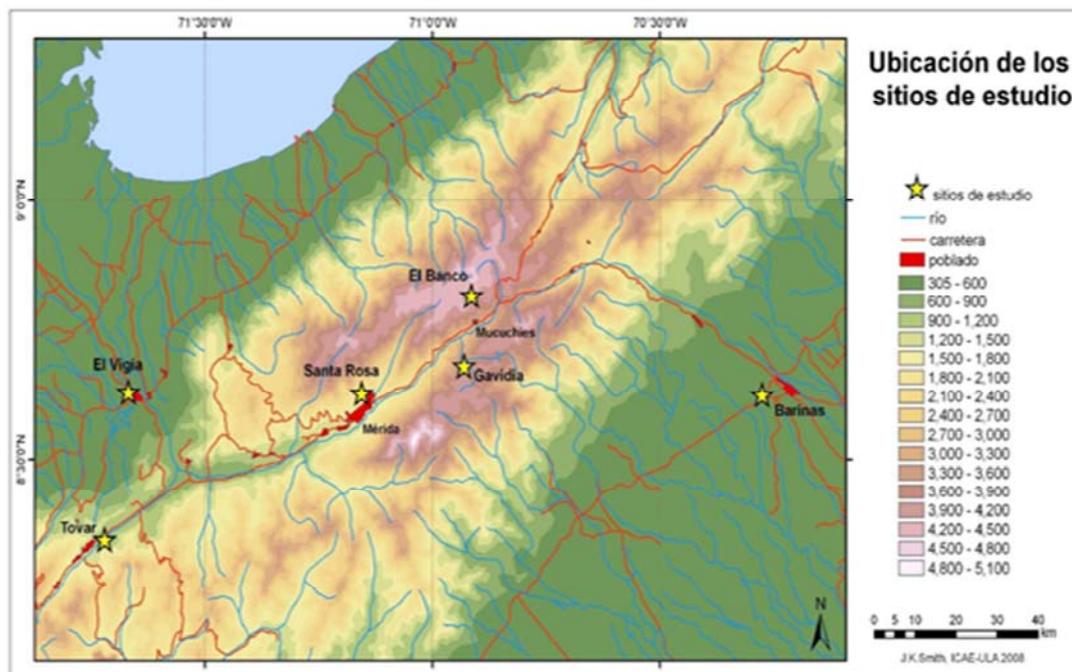


Figura 10: Mapa de ubicación de los sitios de estudio (Elaborado por Smith, JK).

3.1.2- El diseño experimental

El experimento de campo fue desarrollado en cooperación entre investigadores del ICAE (Lina Sarmiento y Dimas Acevedo) y del CEFÉ de Francia (Marie Madelaine Coûteaux y Pierre Bottner) y se encuentra parcialmente publicado en Coûteaux et al., (2001). Los resultados fueron cedidos en su totalidad por los autores para la realización de este estudio.

El experimento consistió en la incubación *in situ* de un material vegetal (paja de trigo), marcado con ^{14}C , en los seis ambientes contrastantes descritos en la sección 3.1.1. Para cada sitio el material marcado fue mezclado con suelo proveniente del mismo sitio y extraído de la primera capa del perfil (0-10 cm) y la mezcla fue colocada en 40 bolsitas de descomposición enterradas a 5 cm de profundidad. Se realizaron 10 muestreos \times 4 repeticiones en cada sitio, lo que hace un total de 240 bolsas de suelo para el conjunto del experimento. En cada uno de estos muestreos se colectaban 4 bolsitas por sitios para la determinación del ^{14}C de la biomasa microbiana, el ^{14}C total remanente y la humedad del suelo.

El tiempo de exposición de las bolsas osciló dependiendo de la altura del sitio, desde 18 meses en dos de los sitios más bajos, 24 meses en Tovar, 31 meses en Santa Rosa y 38 meses en los sitios más altos del estudio. El primer muestreo tuvo lugar un mes después de la instalación del experimento y el intervalo de muestreo fue aumentado con el tiempo hasta llegar a los 6 meses al final de la experiencia para los sitios de altura.

De las figuras 11 a 13, se muestran los valores medidos de acuerdo al tiempo en el que se realizaron los 10 muestreos de cada sitio de estudio.

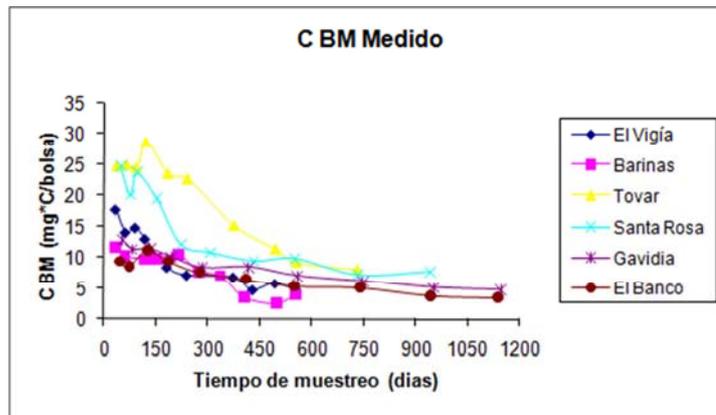


Figura 11: Carbono marcado de la biomasa microbiana medido en las bolsitas de descomposición para los sitios de estudio (Datos del proyecto TRANSALT).

En la figura 12 se muestran los valores medidos del carbono total marcado en las bolsitas de descomposición.

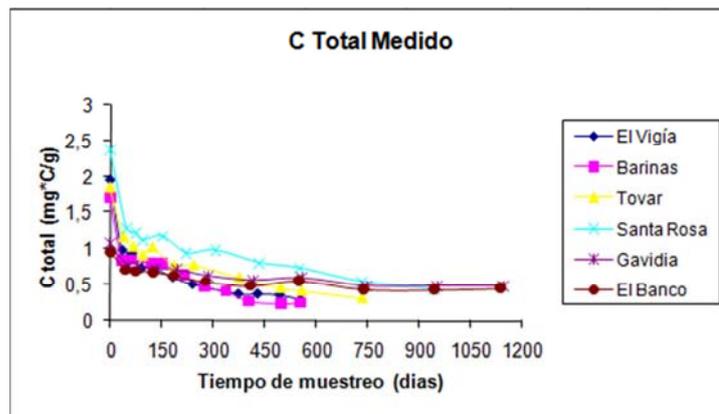


Figura 12: Carbono total marcado medido en las bolsitas de descomposición para los sitios de estudio (Datos del proyecto TRANSALT).

Finalmente, se muestra en la figura 13 los valores de humedad medidos en las bolsitas, con los cuales se calibró el modelo SAHEL.

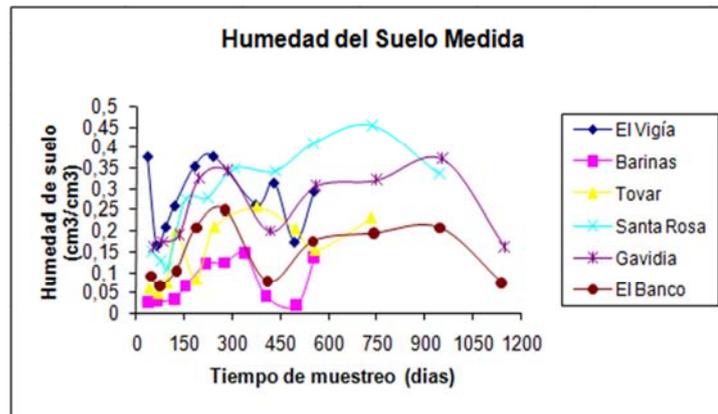


Figura 13: Humedad del suelo medida en las bolsitas de descomposición para los sitios de estudio (Datos del proyecto TRANSALT).

3.2.- Obtención y tratamiento de la información climática

Para organizar los datos climáticos que se necesitan para el cálculo de las funciones de respuesta a la temperatura f_t y a la humedad del suelo f_w , se procedió a recopilar y verificar la calidad de la información climática disponible. En los casos en que esta información no estuviera completa para todo el periodo de estudio o no hubiera una estación meteorológica cercana, se utilizaron diferentes métodos para generarla.

De acuerdo a la información climática disponible para los sitios de estudio, éstos se pueden clasificar en tres grupos:

- 1) aquellos sitios para los cuales existía información disponible para el periodo de estudio proveniente de una estación climática cercana,
- 2) sitios en los que no se disponía de una estación climática cercana y
- 3)

sitios con estación cercana pero con datos incompletos o inexistentes para el periodo de estudio. La descripción de estos grupos se muestra en la figura 14.

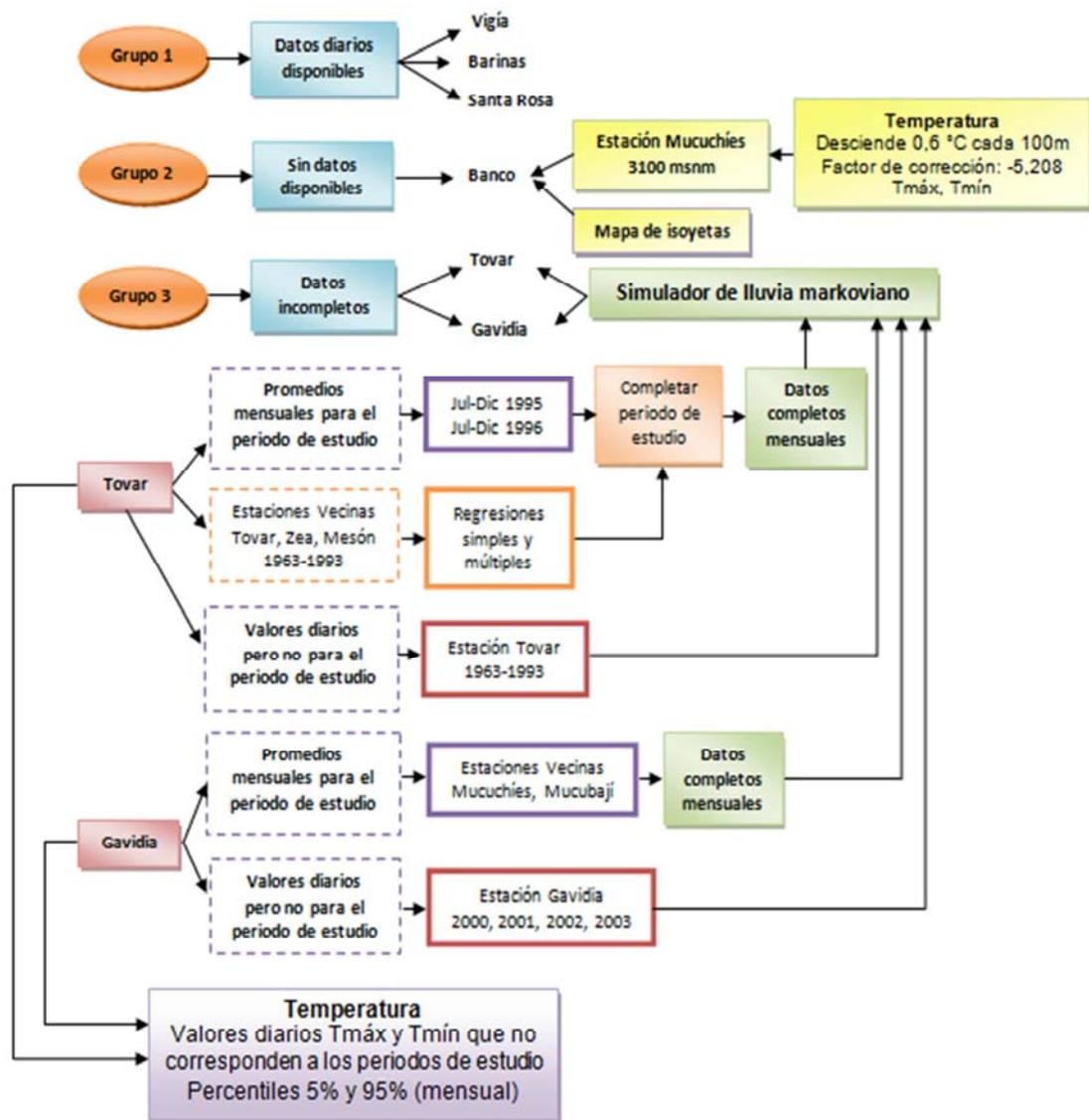


Figura 14: Esquema sobre la obtención y tratamiento de la precipitación y la temperatura.

3.2.1- Grupo 1: Datos diarios disponibles para el periodo en estudio

3.2.1.1.- El Vigía. Se tomaron los datos diarios de precipitación y temperatura, de la estación climática El Vigía (ver figura 18), situada en el aeropuerto Juan Pablo Pérez Alfonso de El Vigía, ubicada a 76 m snm, para el periodo de estudio comprendido desde el 15-12-1994 al 10-06-1996.

3.2.1.2.- Barinas. Se tomaron los datos diarios de precipitación y temperatura, de la estación climática Barinas (ver figura 18), situada en el aeropuerto de Barinas, a 203 m snm, para el periodo de estudio comprendido desde el 06-12-1994 al 11-06-1996.

3.2.1.3.- Santa Rosa. Se tomaron los datos diarios de precipitación y temperatura, de la estación climática Santa Rosa (ver figura 18), perteneciente al Instituto de Investigaciones Agropecuarias de la Universidad de Los Andes (IIA-ULA) de Mérida, situada a 1940 m snm, para el periodo de estudio, comprendido desde el 30-11-1994 al 01-07-1997.

3.2.2.- Grupo 2: Sin datos diarios disponibles para el periodo de estudio y sin estación climática cercana

3.2.2.1.- El Banco. La estación climática más cercana con datos para el periodo de estudio, que va desde el 02-12-1994 al 13-01-1998, es la estación Mucuchíes (ver figura 18), perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA) de Mérida. Sin embargo, esta estación está situada a 3100 m snm, bastante por debajo del área de estudio (3968 m) y a una distancia de casi 1 Km, por lo que se hizo necesario aplicar algunos factores de corrección.

La temperatura, se corrigió considerando que en esta zona la temperatura desciende en promedio 0.6 °C cada 100 m, por lo que una diferencia de altura de 868 m implica un factor de corrección de -5.208. Este factor fue restado de las temperaturas mínimas y máximas diarias medidas en Mucuchíes para obtener una aproximación de lo que sería la temperatura en el área del experimento. Para la precipitación, se calculó un factor de corrección en base al mapa de isoyetas de precipitación media de la cuenca del río Chama, publicado por Andressen y Ponte (1973), considerando que la isoyeta que pasa por el área de estudio es la de 780 mm y la que pasa por la estación Mucuchíes es la de 620 mm (ver figura 15), calculándose un factor de corrección de 1.26, el cual se multiplicó por cada evento de lluvia registrado en Mucuchíes.

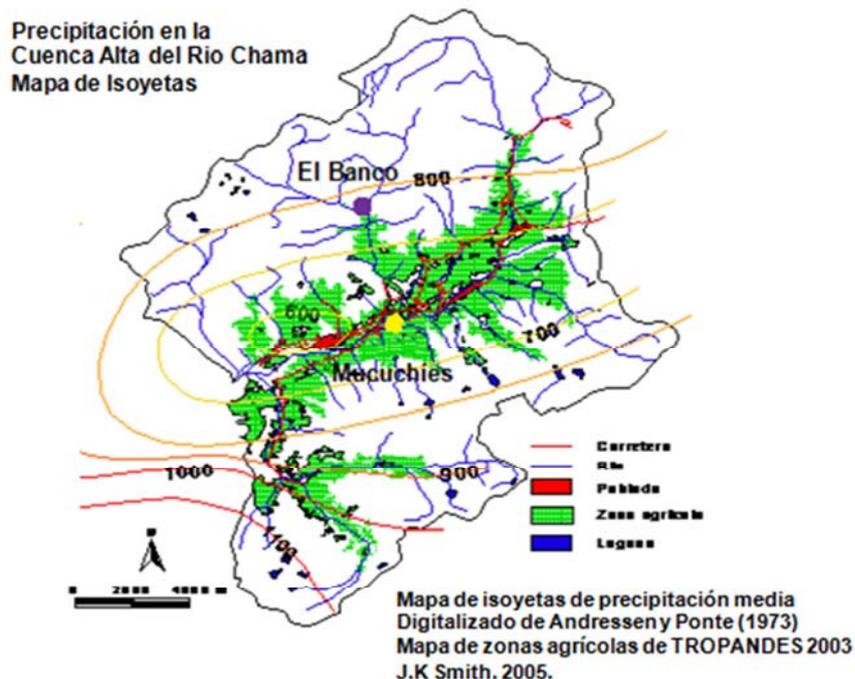


Figura 15: Mapa de isoyetas de precipitación en la cuenca alta del río Chama (Digitalizado de Andressen y Ponte (1973) por Smith, JK).

3.2.3.- Grupo 3: Con estación climática cercana pero con datos incompletos o ausentes para el periodo en estudio

3.2.3.1.- Tovar. La estación climática Tovar, situada a 952 m snm (ver figura 18), se encuentra a corta distancia del área de estudio, la cual tiene una serie larga de datos climáticos continuos a nivel diario (1969 a 1993) y posteriormente en forma intermitente hasta 1996. Para el periodo de estudio, que va desde el 01-12-1994 al 3-12-1996, sólo estuvo funcionando entre los meses de Julio hasta Diciembre para los años 1995 y 1996, faltando datos para el resto de los meses, es decir, un total de 13 meses sin datos.

Por otro lado, sólo fue posible conseguir la data mensual y no diaria para los meses del periodo de estudio en que si había datos. Para estimar los datos faltantes se utilizó información climática de otras dos estaciones situadas en las cercanías del sitio de estudio: Zea La Florida, situada a 900 m snm y El Mesón, situada a 1264 m snm (ver figura 18), las cuales también presentan series largas de datos. Estas tres estaciones pertenecen al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) de Mérida.

Con este fin, se analizó las relaciones entre la precipitación de la estación Tovar y la de las otras dos. Se calcularon regresiones simples utilizando los valores de precipitación diaria de las tres estaciones para los periodos en que se disponía de datos. Sin embargo, los coeficientes de correlación R^2 en base a valores diarios resultaron muy bajos para varios meses, como se muestra en la tabla 7.

Meses	Valores de R^2	
	Tovar-Zea	Tovar-Mesón
Enero	0,738 *	0,421 *
Febrero	0,086 ^{NS}	0,529 *
Marzo	0,000 ^{NS}	0,548 *
Abril	0,138 ^{NS}	0,701 *
Mayo	0,412 *	0,028 ^{NS}
Junio	0,394 *	0,404 *
Julio	0,450 *	0,219 *
Agosto	0,019 ^{NS}	0,394 *
Septiembre	0,010 ^{NS}	0,168 *
Octubre	0,232 *	0,076 ^{NS}
Noviembre	0,680 *	0,534 *
Diciembre	0,733 *	0,382*

Tabla 7: Regresiones simples entre la precipitación mensual de Tovar y las estaciones cercanas Zea la Florida y el Mesón, $n=24$, el asterisco indica que la regresión es significativa a $p<0.05$ y NS que no es significativa.

Luego, para determinar el grado de significancia entre las estaciones usadas para Tovar, se realizó un análisis de varianza a través de la prueba F (Keat y Young, 2009), en el que se definieron las siguientes hipótesis.

H0: $b=0$, significa que no hay relación entre la estación Tovar y las estaciones Zea La Florida y el Mesón.

H1: $b\neq 0$, significa que hay relación entre la estación Tovar y las estaciones Zea La Florida y el Mesón.

Esta prueba está definida en términos del coeficiente de correlación R^2 , como lo indica la ecuación 3.1.

$$F = \frac{R^2 / k}{(1 - R^2) / (n - k - 1)} \quad (3.1)$$

donde, n es el tamaño de la muestra, k el número de variables independientes y $(n-k-1)$ representa los grados de libertad.

En nuestro caso, con un valor $n=24$ y $k=1$, se obtuvieron los valores mensuales estimados de F . Luego, con un nivel de significancia de 0.05 y con 22 grados de libertad a través de la tabla de distribución F se obtiene un valor crítico de 4,3009.

Lo que indica, que se rechaza la hipótesis nula, ya que los valores de F estimados son mayores que el valor F crítico para algunos meses, afirmándose que existe una relación estadísticamente significativa entre la estación Tovar y las estaciones Zea La Florida y el Mesón con un 95% de confianza, para los meses marcados con asterisco, como se muestra en la tabla 7.

Para tratar de obtener una mejor predicción se realizaron regresiones múltiples, en base a promedios mensuales para los periodos en que había datos disponibles (1969-1993), usando el programa estadístico SPSS®, las cuales presentaron un mejor ajuste en todos los meses, como lo indica la tabla 8.

Meses	Valores de R^2
	Tovar-Zea-Mesón
Enero	0,747 *
Febrero	0,510 *
Marzo	0,574 *
Abril	0,843 *
Mayo	0,412 *
Junio	0,493 *
Julio	0,427 *
Agosto	0,252 *
Septiembre	0,503 *
Octubre	0,316 *
Noviembre	0,766 *
Diciembre	0,725 *

Tabla 8: Regresiones múltiples entre la precipitación mensual de Tovar y las estaciones cercanas Zea la Florida y el Mesón, $n=24$, el asterisco indica que la regresión es significativa a $p<0.05$.

De igual manera, al aplicar la prueba F , con hipótesis similares a las planteadas para las regresiones simples y con un valor $n=24$ y $k=2$ se obtuvieron los valores mensuales estimados de F . Luego, con un nivel de significancia de 0.05 y con 21 grados de libertad a través de la tabla de distribución F se obtiene un valor crítico de 3,4668.

Lo que indica, que se rechaza la hipótesis nula, ya que los valores de F estimados son mayores que el valor F crítico, afirmándose que existe una relación estadísticamente significativa entre la estación Tovar y las estaciones Zea La Florida y el Mesón con un 95% de confianza para todos los meses, como se muestra en la tabla 8.

Por otra parte, la precipitación de los meses faltantes se calculó a partir de las estaciones cercanas y de las regresiones simples o múltiples para el periodo de estudio.

Se utilizaron regresiones múltiples cuando existían datos para el mes en ambas estaciones vecinas, regresiones simples cuando sólo existían datos en una de las dos. Para el mes de mayo de 1996 que no existían datos de ninguna de las estaciones vecinas se utilizó el promedio mensual medido en Tovar para el periodo 1969-1993, como lo muestra la tabla 9.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1994												34,92
1995	5,17	29,82	64,20	86,62	96,52	77,09	50,18	100,10	69,80	148,50	169,60	116,00
1996	52,79	37,68	60,20	113,84	122,48	91,51	72,50	47,30	96,60	218,00	156,00	81,10

- Datos medidos en la estación de Tovar
- Estimado a partir de Zea la Florida
- Estimado por regresión múltiple con Zea la Florida y El Mesón
- Estimado a partir de El Mesón
- Promedio mensual de Tovar para el periodo 69-93

Tabla 9: Promedios mensuales de precipitación para Tovar calculados a partir de regresiones simples o múltiples con las estaciones cercanas de Zea La Florida y el Mesón, en función de la disponibilidad de datos en las diferentes estaciones para cada mes.

En la figura 16, se muestran los datos mensuales de precipitación estimados con este procedimiento para Tovar, correspondientes al periodo de estudio.

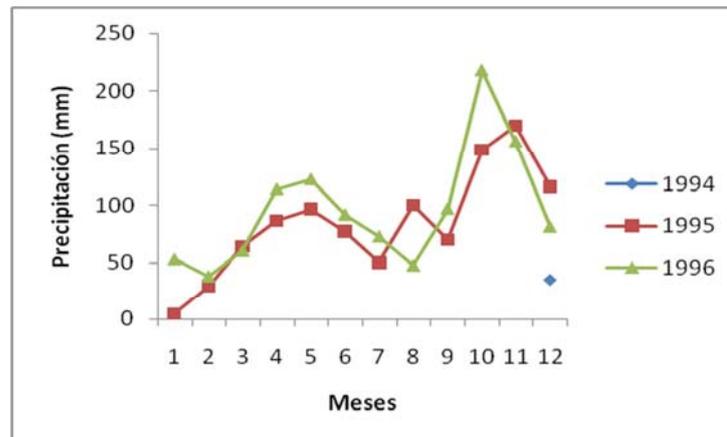


Figura 16: Promedios mensuales de precipitación para Tovar medidos o calculados a partir de las estaciones Zea la Florida y el Mesón.

Para la temperatura, se tomaron los valores diarios de las temperaturas máximas y mínimas de la estación Tovar, para los años 1977, 1978, 1980, 1981 y 1982 (datos completos), luego se consideraron los percentiles al 5% y 95% de las distribuciones de frecuencia de estos datos, para obtener las temperaturas correspondientes al periodo de estudio, simuladas de acuerdo a las ecuaciones 3.2 y 3.3, las cuales se aplicaron tanto a las temperaturas máximas como a las mínimas.

$$T \max = T \max_{0.05} + U * (T \max_{0.95} - T \max_{0.05}) \quad (3.2)$$

$$T \min = T \min_{0.05} + U * (T \min_{0.95} - T \min_{0.05}) \quad (3.3)$$

donde, U es un número aleatorio entre 0 y 1.

3.2.3.2.- Gavidia. Se siguió un procedimiento muy similar al explicado para Tovar, a diferencia que para Gavidia se obtuvieron los promedios mensuales de precipitación completos para el periodo de estudio, que va desde el 23-11-1994 al 13-01-1998, calculados con información de dos

estaciones cercanas al sitio: Mucuchíes, situada a 3100 m snm y Mucubají, situada a 3560 m snm (ver figura 18). De igual manera, se cuenta con valores diarios de precipitación (2000, 2001, 2002 y 2003) de la estación climática Gavidia, ubicada a 3267 m snm (ver figura 18). La estación Mucubají pertenece al Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables (MARNR) de Mérida y la estación Gavidia al Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas de la Universidad de Los Andes (ICAE).

Los promedios mensuales de precipitación correspondientes al periodo de estudio, calculados a partir de las estaciones Mucuchíes y Mucubají se muestran en la figura 17.

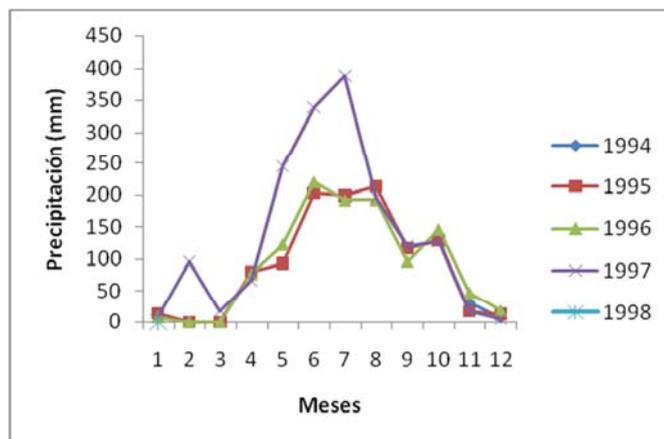


Figura 17: Promedios mensuales de precipitación para Gavidia calculados a partir de las estaciones Mucuchíes y Mucubají.

Para calcular la temperatura de Gavidia, se realizó el mismo procedimiento explicado para Tovar, usando las ecuaciones 3.2 y 3.3, con los valores diarios de las temperaturas máximas y mínimas de la estación Gavidia, para los años 2000, 2001, 2002 y 2003 (datos completos).

Finalmente, en la figura 18 se muestra un mapa topográfico con la ubicación de los sitios de estudio y de las estaciones utilizadas para la obtención y tratamiento de la información climática.

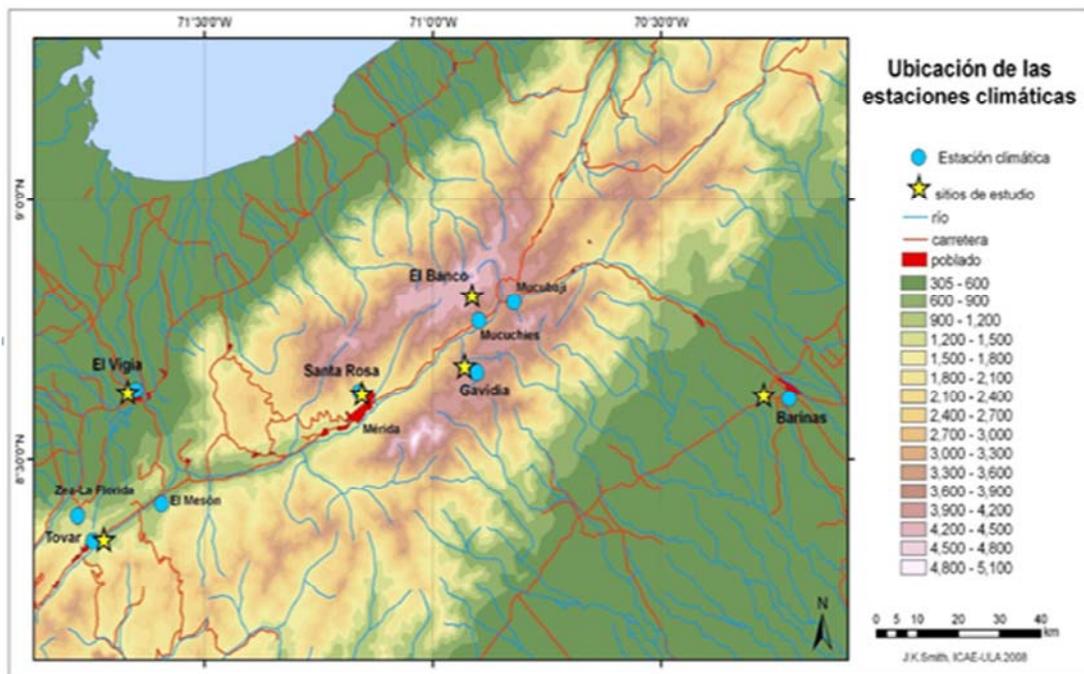


Figura 18: Mapa de ubicación de las estaciones climáticas por cada sitio de estudio (Elaborado por Smith, JK).

3.2.4.- Simulación de la precipitación a nivel diario

Como no se tienen los datos diarios de precipitación para Tovar y Gavidia, se tomaron los promedios mensuales calculados a partir de las estaciones vecinas, para luego hacer una conversión de valores mensuales a valores diarios, a través de la aplicación de un Simulador de Lluvia Markoviano (Ablan, 2007), desarrollado en el programa estadístico Lenguaje R®. El funcionamiento de este simulador se muestra en la figura 19.

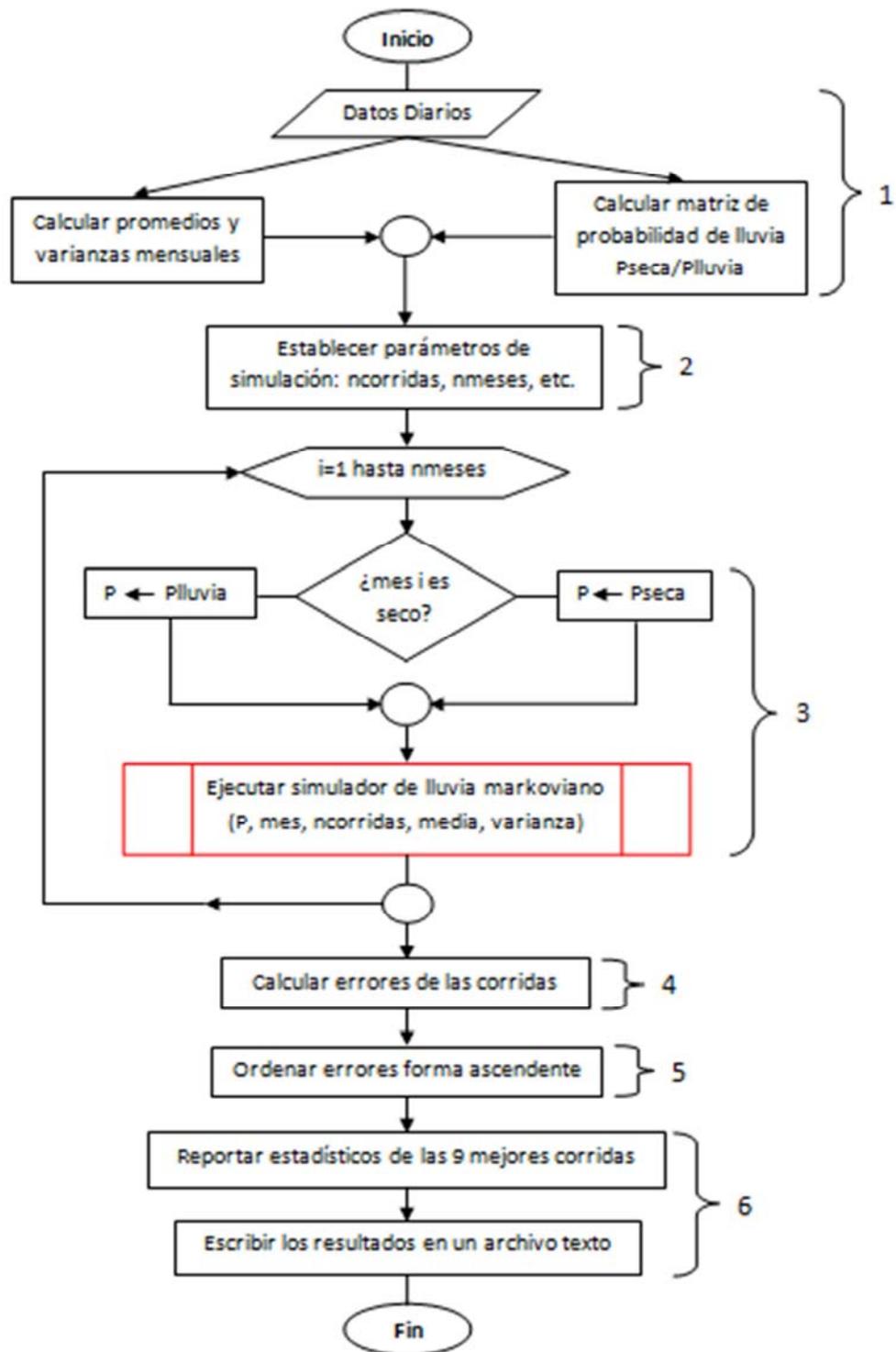


Figura 19: Funcionamiento del simulador de lluvia markoviano (Ablan, 2007).

Las etapas de este simulador se describen a continuación.

1. Partiendo de los datos diarios disponibles, pero no para el periodo de estudio de Tovar y Gavidia, se calculan los totales, promedios y varianzas mensuales característicos de la precipitación en el sitio y se calcula la matriz markoviana de probabilidades de transición de lluvia. La estructura de esta matriz se muestra en la ecuación 3.4.

$$P = \begin{pmatrix} P_{nn} & P_{nl} \\ P_{ln} & P_{ll} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

donde, P_{nn} es la probabilidad de que dado que hoy no llueve, mañana no llueva; P_{nl} es la probabilidad de que dado que hoy llueve, mañana no llueva; P_{ln} es la probabilidad de que dado que hoy no llueve, mañana si llueva y P_{ll} es la probabilidad de que dado que si hoy llueve, mañana si llueva.

Se calculan dos matrices diferentes, una para la temporada seca (diciembre a marzo) y otra para la lluviosa (abril a noviembre) de ambos sitios.

2. Se establecen varios parámetros de control para la simulación: número de corridas deseadas, número de meses y días por mes a simular, entre otros.
3. Para el período a simular se selecciona la matriz de probabilidades de transición correspondiente a cada mes y se llama al simulador de lluvia markoviano, indicándole como argumentos la matriz, el número de días, la media y la varianza características de la precipitación para el mes dado.

La figura 20 muestra el flujograma de este simulador que se describe en más detalle en la sección 3.2.4.1. Al finalizar este lazo se tiene la lluvia diaria simulada para el período de estudio y para el número de corridas especificadas, de acuerdo a una distribución gamma.

4. Se procede a calcular la raíz del error cuadrático medio ($\%RMSE$) de cada una de las corridas, comparando el total de lluvia simulado en un mes dado con el total mensual observado.
5. Las corridas se ordenan de manera ascendente de manera de que sea fácil seleccionar aquellas en donde hay menor error.
6. Finalmente, se reportan estadísticas descriptivas y gráficos (histogramas y gráficos temporales) para las nueve mejores corridas y se escriben los resultados en un archivo texto, separados por coma que fácilmente pueden ser llevados a Microsoft Office Excel o Vensim[®] (Ablan, 2007).

3.2.4.1- Simulador de lluvia markoviano

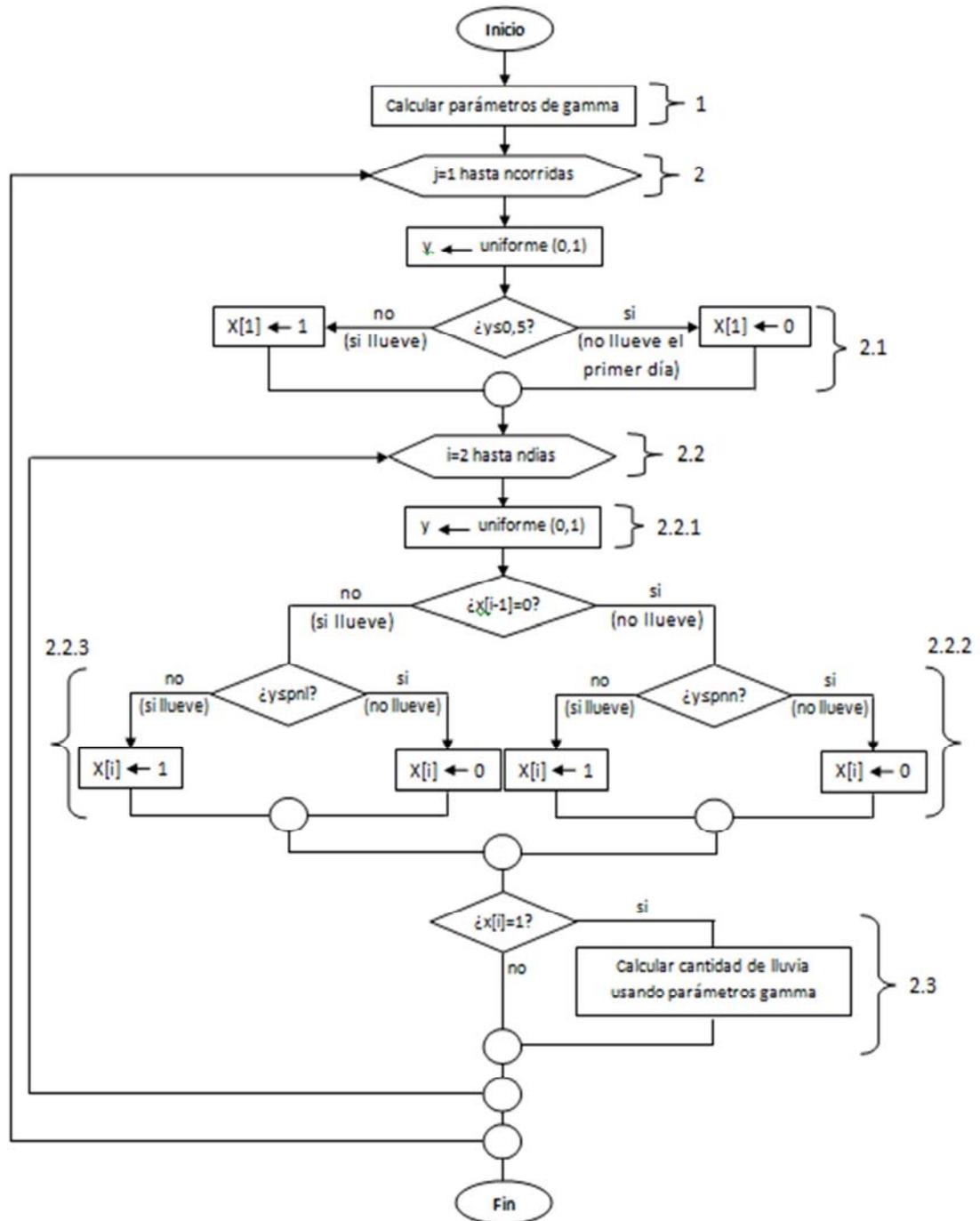


Figura 20: Diagrama de flujo del simulador de lluvia markoviano (Ablan, 2007).

Este simulador consta de las siguientes etapas.

1. Calcule los parámetros de la distribución gamma: θ es el parámetro de escala y k el parámetro de forma, correspondientes a la cantidad de lluvia mensual. Esta distribución se calcula a través de la ecuación 3.5.

$$\begin{aligned}\theta &= \sigma^2 / \mu \\ k &= \mu^2 / \sigma^2\end{aligned}\tag{3.5}$$

donde, μ es la media aritmética de una población y σ^2 es la varianza muestral.

2. Para cada una de las corridas repita el siguiente lazo:
 - 2.1 Inicialice al azar si el primer día llueve o no. Para esto se genera un número aleatorio uniforme entre 0 y 1. Si este número es menor o igual a 0.5 ese día no llueve ($X[1]=0$), de lo contrario, si llueve ($X[1]=1$).
 - 2.2 Para cada i correspondiente a los días sucesivos del mes repita el siguiente proceso:
 - 2.2.1 Genere un número aleatorio uniforme y entre 0 y 1.
 - 2.2.2 Si el día anterior no llovió ($X[i-1]=0$), use P_{nn} para decidir si llueve o no este día. No llueve si $y \leq P_{nn}$ ($X[i]=0$), de lo contrario llueve ($X[i]=1$).
 - 2.2.3 Si el día anterior llovió ($X[i-1]=1$), use P_{nl} para decidir si llueve o no este día. No llueve si $y \leq P_{nl}$ ($X[i]=0$), de lo contrario llueve ($X[i]=1$).
 - 2.3 Si llueve, calcule la cantidad de lluvia generando un número aleatorio gamma con parámetros θ y k (Ablan, 2007).

3.3.- Estimación de la humedad diaria del suelo

Para obtener la dinámica del agua en el suelo que requiere el modelo MOMOS para calcular la función de respuesta a la humedad, se utilizará el modelo SAHEL, el cual debe ser calibrado, utilizando los datos de humedad del suelo medidos en campo. En la figura 21 se muestra el acoplamiento de estos modelos.

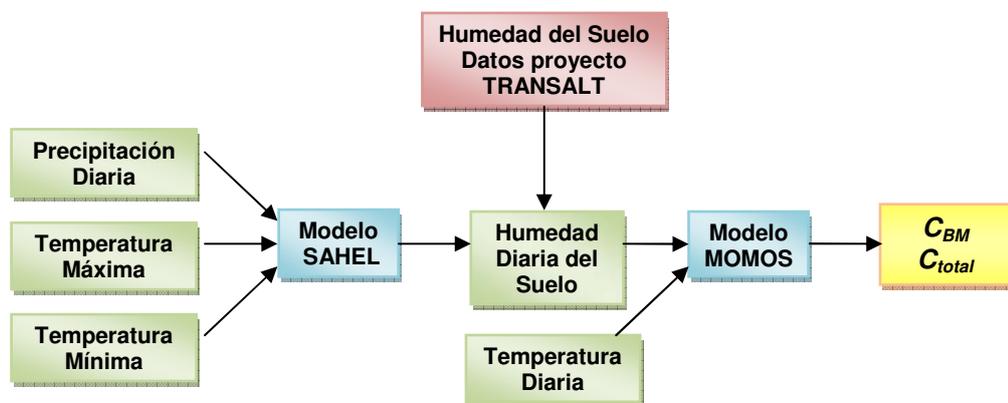


Figura 21: Acoplamiento de los modelos SAHEL y MOMOS.

Para la calibración del modelo SAHEL, se organizaron los archivos de entrada en Microsoft Office Excel por cada sitio de estudio, con la información sobre las características de clima y suelo. Esta información de se muestra en la tabla 10.

Variables	Descripción
<i>Time</i>	Indica el tiempo inicial hasta el final del periodo de estudio
<i>Fecha</i>	Indica el día, mes y año del periodo de estudio
<i>Doy</i>	Indica los días del experimento en el Calendario Juliano
<i>Tmáx</i>	Temperatura máxima diaria (°C).
<i>Tmín</i>	Temperatura mínima diaria (°C).
<i>Rain</i>	Precipitación diaria (mm).
<i>Soilwater</i>	Datos de humedad del suelo medidos en campo (cm ³ /cm ³)
<i>Lai</i>	Índice de área foliar (m ² /m ²).
<i>Lat</i>	Latitud en grados decimales
<i>Sc</i>	Cobertura del suelo
<i>Stoniness</i>	Pedregosidad del suelo (v/v).
<i>Initialmoisture</i>	Humedad inicial del suelo (cm ³ /cm ³).
<i>Tkllitter</i>	Espesor de la hojarasca (mm).
<i>Wcad</i>	Humedad del suelo secado al aire por capa (cm ³ /cm ³).
<i>Wcfc</i>	Capacidad de campo por capa (cm ³ /cm ³).
<i>Wcwp</i>	Punto de marchitamiento por capa (cm ³ /cm ³).

Tabla 10: Información de entrada del modelo SAHEL (Penning de Vries et al., 1989).

Los valores de *Stoniness*, *Initialmoisture*, *Tkllitter*, *Wcad*, *Wcfc*, *Wcwp*, se deben definir por cada capa de suelo a estudiar. Se generaron seis archivos de entrada, uno por cada sitio los cuales se cargan en el modelo SAHEL de manera independiente para obtener la humedad diaria del suelo en cada caso.

Para realizar esta calibración se usará la opción *Optimization* del Vensim[®], cuyo método de optimización numérica *Powell*, encuentra a través del espacio de búsqueda el mejor ajuste del parámetro con respecto al valor de partida.

Además, se usó un paso de tiempo de 1 y el método de *Euler*, como técnica de integración numérica, ya que se realizaron pruebas con dos pasos de tiempo (0,5 y 1) y con las técnicas de integración numéricas (*Euler* y *Runge Kutta*) sobre las variables a estudiar, donde no se observaron diferencias en los resultados obtenidos. La unidad del tiempo de la simulación es días y su duración corresponde a los diferentes periodos de estudio.

3.4.- Implementación del modelo MOMOS-6 en Vensim®

El modelo MOMOS-6 fue reproducido en Vensim® (versión 5.6b). Como se tiene un solo modelo basado en el funcionamiento de la biomasa microbiana del suelo, el cual deberá ser validado para seis sitios de estudio, con distintos tiempos de simulación (días) y valores de clima y suelo, se usó la opción *Subscript* del Vensim®, que permite personalizar la estructura del modelo, con diferentes constantes, ecuaciones e incluso múltiples subíndices, es decir, que podemos correr un solo modelo para los 6 sitios de estudio simultáneamente y obtener resultados por separado.

Además, se utilizó la descripción y los parámetros publicados en Pansu et al., (2004), pero agregándole la variable C_{total} , la cual suma la cantidad de carbono presente en los cinco compartimientos del modelo, necesaria para la validación del mismo.

La reproducción del modelo MOMOS-6 se muestra en la figura 22.

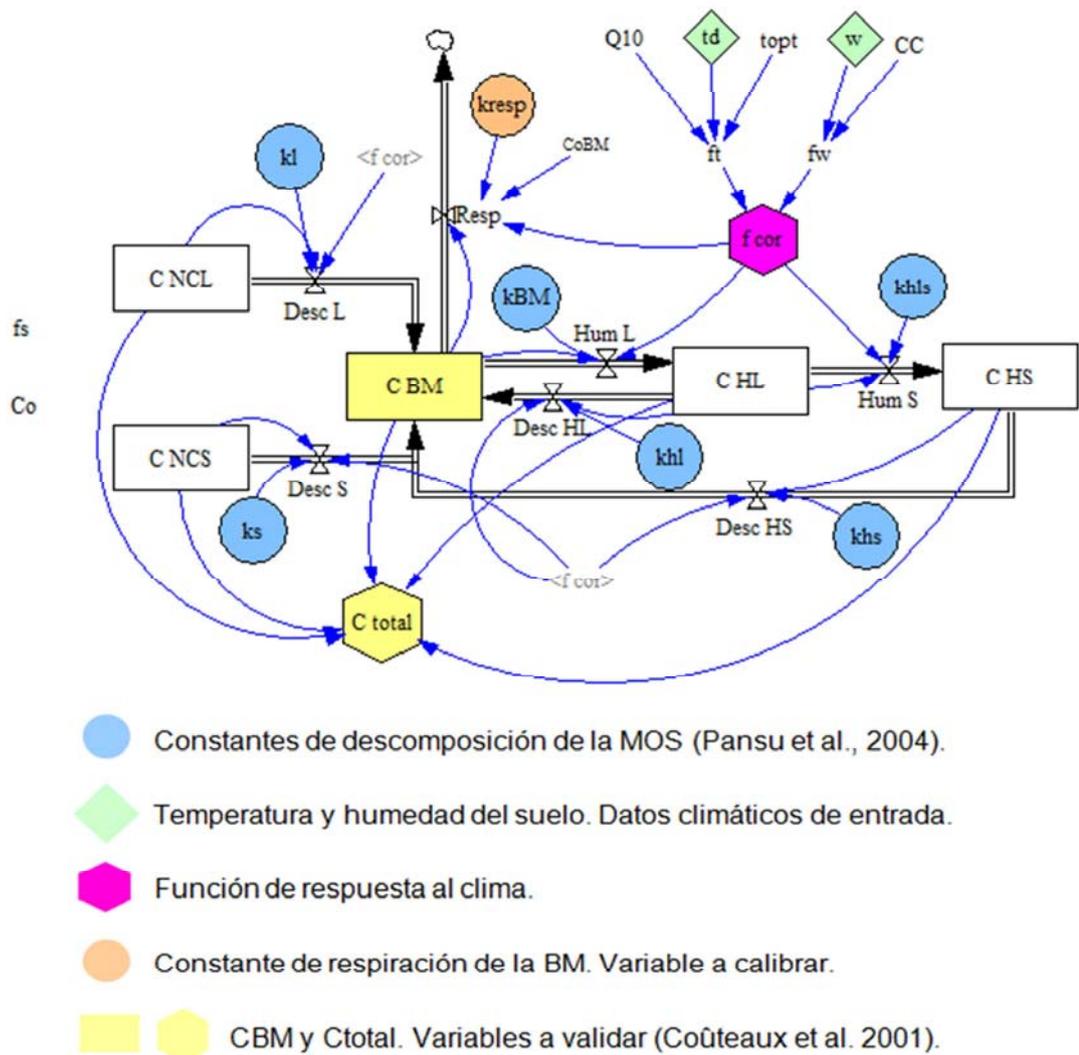


Figura 22: Esquema del modelo MOMOS-6 reproducido en el software Vensim®.

En la estructura del modelo MOMOS, se modificaron los nombres de los compartimientos, flujos, variables y parámetros, desde la versión original de MOMOS-6 (Pansu et al., 2004), pero siguen teniendo el mismo significado y función; esto con la finalidad de adaptarlo al idioma español, para un mejor entendimiento del modelo.

La necromasa que entra al modelo MOMOS, se divide en dos compartimientos: necromasa lábil (C_{NCL}) y necromasa estable (C_{NCS}) de acuerdo con el parámetro f_s que es la fracción estable de la misma.

En el experimento se utilizó un material (paja de trigo) con un valor de f_s de 0.144, calculado según su composición bioquímica (paja pobre, C:N=130, Bottner et al., 2006). Esta fracción puede en teoría variar en un intervalo entre 0 y 1, siendo 0 completamente lábil y 1 completamente estable.

Esta fracción junto con el valor de C_o , que es el carbono inicial de la necromasa adicionada por cada sitio de estudio (1.963 g C*kg⁻¹ (El Vigía), 1.724 g C*kg⁻¹ (Barinas), 1.8475 g C*kg⁻¹ (Tovar), 2.3876 g C*kg⁻¹ (Santa Rosa), 1.0812 g C*kg⁻¹ (Gavidia), 0.9729 g C*kg⁻¹ (El Banco)), define la cantidad y calidad de la misma.

Esta entrada de necromasa al sistema, se realiza una sola vez al inicio de la simulación para los seis sitios de estudio, para determinar la dinámica del carbono entre los compartimientos.

3.4.1.- Constantes de descomposición de la MOS. Son las que determinan el flujo de carbono entre los compartimientos, están expresadas en día⁻¹ y sus valores fueron tomados del artículo de Pansu et al., (2004), tal y como se muestra en la tabla 11.

Constantes	Descripción	Valores
k_l	Constante de descomposición de la VL	0.6
k_s	Constante de descomposición de la VS	0.003
k_{BM}	Constante de humificación a partir de la BM	0.45
k_{hl}	Constante de descomposición del HL	0.05
k_{hs}	Constante de descomposición del HS	$5 \cdot 10^{-5}$
k_{hls}	Constante de humificación del HL al HS	$3 \cdot 10^{-4}$
k_{resp}	Constante de respiración de la BM	0.03

Tabla 11: Constantes de descomposición en día⁻¹ de los distintos compartimientos de la MOS utilizadas en el modelo MOMOS (Pansu et al., 2004).

En la tabla 12, se muestran los flujos del modelo en g C/kg*día, los cuales están influenciados por la función de respuesta al clima.

Flujos	Descripción
Desc L	Descomposición de la necromasa lábil
Desc S	Descomposición de la necromasa estable
Hum L	Humificación de la biomasa microbiana
Hum S	Humificación del humus lábil
Desc HL	Descomposición del humus lábil
Desc HS	Descomposición del humus estable
Resp	Respiración de la biomasa microbiana

Tabla 12: Flujos entre los compartimientos del modelo MOMOS en g C/kg*día (Pansu et al., 2004).

3.4.2.- Datos climáticos de entrada. Vienen dados por la temperatura diaria (td) y por la humedad diaria del suelo (w). Ambas variables climáticas fueron organizadas en dos archivos Microsoft Office Excel, correspondientes al periodo del experimento de cada sitio de estudio.

3.4.3.- Función de respuesta al clima (*f_{cor}*). Es el producto de la función de respuesta a la temperatura *f_t* y de la función de respuesta a la humedad del suelo *f_w*. Esta función de respuesta al clima ajusta los valores de los parámetros del modelo a las condiciones climáticas de cada sitio e influencia todas las transferencias que ocurren en el modelo. En la tabla 13, se muestran las fórmulas para calcular esta función de respuesta al clima.

<i>f_{cor}</i>	Ecuación	Parámetros	Significado	Valores
<i>f_t</i>	$f_t = Q_{10}^{((td - topt)/10)}$	<i>Q₁₀</i>	Tasa reacción (10°C)	2.2
		<i>td</i>	Temperatura diaria	Valores por sitio (°C)
		<i>topt</i>	Temperatura óptima	28 °C
<i>f_w</i>	$f_w = w / CC$	<i>w</i>	Humedad diaria del suelo	Valores por sitio (cm ³ /cm ³)
		<i>CC</i>	Capacidad de Campo	Valores por sitio (cm ³ /cm ³)

Tabla 13: Funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo (Pansu et al., 2004).

3.4.4.- Constante de respiración de la *BM* (*k_{resp}*). Este parámetro es necesario para calcular la respiración de la biomasa microbiana (*Resp*). Esta respiración se rige por el coeficiente metabólico de respiración *qCO₂* (día⁻¹), el cual indica cuánto se respira por unidad de biomasa. Este coeficiente viene dado por la ecuación 3.6.

$$qCO_2 = K_{resp} \frac{BM}{C_{BM}^0} \quad (3.6)$$

donde, la constante C_{BM}^0 , es el carbono de la biomasa microbiana en estado de equilibrio, correspondiente a cada sitio de estudio que se

estima como el valor final del C_{BM} medido en el último muestreo en cada sitio (Pansu et al., 2004).

3.5.- Estrategia de validación del modelo MOMOS

Para validar el modelo MOMOS es necesario calibrar la constante de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp}) y calcular de la función de respuesta al clima (f_{cor}) para cada sitio de estudio. Las variables medidas que se utilizan para calibrar k_{resp} y evaluar el modelo son el carbono marcado de la biomasa microbiana (C_{BM}) y el carbono marcado total del sistema (C_{total}), las cuales serán comparadas con la salida del modelo, como se muestra en la figura 23.

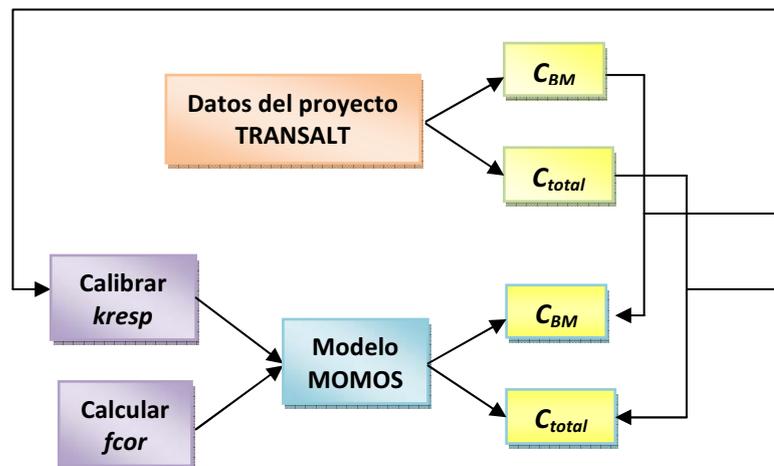


Figura 23: Esquema de validación del modelo MOMOS.

Para calibrar k_{resp} se tomó un valor inicial de 0.03 día^{-1} del estudio realizado por Pansu et al., (2001) para los seis sitios y se definió un intervalo para este parámetro entre [0-0,1] en el módulo *Optimization* del Vensim[®], con la intención de que el programa estime el valor de k_{resp} óptimo para cada sitio. Vensim[®] genera varias simulaciones con un valor

Payoff (mejor ajuste con los datos medidos), donde se escogen los valores de k_{resp} asociados al mejor valor de *Payoff*. Con estos valores calibrados de k_{resp} por cada sitio de estudio, se realiza el proceso de validación del modelo MOMOS para el gradiente altitudinal.

3.6- Métodos estadísticos de evaluación para la validación del modelo MOMOS

Para evaluar los resultados de la calibración del modelo SAHEL y la validación del modelo MOMOS, se usarán los siguientes métodos estadísticos.

3.6.1.- Porcentaje de la raíz del error cuadrático medio (%RMSE). Nos da una medida de las diferencias porcentuales entre los valores simulados y los observados y se calcula a través de la ecuación 3.7.

$$\%RMSE = \sqrt{\sum_n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} * 100 \quad (3.7)$$

donde, P_i son los valores simulados, O_i los valores observados y n es el número de valores observados. Así mismo, el criterio de evaluación del resultado del estadístico, según Jamieson et al., (1991), es considerado como se indica en la tabla 14.

%RMSE	Valoración
<10%	Excelente
10%<%RMSE<20%	Bueno
20%<%RMSE<30%	Regular
>30%	Malo

Tabla 14: Valoración del estadístico %RMSE (Jamieson et al., 1991).

3.6.2.- Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NS). Es usado para evaluar la eficiencia de los resultados de las simulaciones y se calcula a través de la ecuación 3.8.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3.8)$$

donde, O_i representan los valores observados, P_i es la salida del modelo y \bar{O} es el promedio de los valores observados. Este coeficiente puede variar en un rango desde $-\infty$ a 1. Una eficiencia de 1 corresponde a un ajuste perfecto entre niveles simulados y observados. Una eficiencia de 0 indica que las predicciones del modelo no son tan precisas como la media de los datos observados, mientras que una eficiencia negativa $-\infty < NS < 0$ ocurre cuando la media observada es mejor que la predicción del modelo. En definitiva, cuando el coeficiente NS es más cercano a la unidad, mejor es la concordancia entre los valores simulados y observados (Wainwright y Mulligan, 2004). Para la aplicación de estos estadísticos se usaran los diez valores medidos en el experimento de campo y los diez valores simulados que corresponden al tiempo en que se realizaron los muestreos a lo largo del tiempo.

3.7.- Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad consistió en modificar las hipótesis de los valores de las constantes en el modelo MOMOS y examinar los resultados debido al cambio en esos valores. La simulación de Montecarlo, también conocida como simulación de sensibilidad multivariable (MVSS), realiza este procedimiento automáticamente. Se pueden realizar cientos o miles de simulaciones con las constantes modificadas a lo largo de un rango de valores (García, 2007).

El método de análisis de sensibilidad multivariable de Montecarlo trabaja probando un conjunto de números dentro de un cierto rango. Para realizar un análisis multivariable, muestrea la distribución para cada parámetro especificado y los valores resultantes se usan en la simulación. La distribución más simple es la distribución uniforme aleatoria en la que es igualmente probable que ocurra cualquier número entre el valor mínimo y máximo. La distribución uniforme aleatoria es aplicable para la mayoría de los análisis de sensibilidad y es seleccionada por omisión en Vensim® (García, 2007).

Para evaluar los resultados puede aplicarse el índice de sensibilidad (*IS*) (Haefner, 2005), que se utiliza para caracterizar la sensibilidad del modelo, comparando el cambio en la salida del modelo con respecto a la respuesta del modelo para un conjunto nominal de parámetros de entrada y viene dado por la ecuación 3.9.

$$IS = \frac{(R_{\max} - R_{\min}) / R_n}{(P_{\max} - P_{\min}) / P_n} \quad (3.9)$$

donde, R_{\max} , R_{\min} son las respuestas del modelo ante un cambio en los parámetros nominales, P_{\max} , P_{\min} son los cambios en los parámetros nominales y R_n , P_n es la media de los valores simulados y reales (Haefner, 2005). Para este análisis se usó un rango de variación de $\pm 10\%$ en los parámetros del modelo MOMOS.

3.8.- Aplicación del modelo MOMOS: Respuesta de la MOS a escenarios de cambio climático en Venezuela

En la Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela, emitida por la Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología del Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN), se analizaron los patrones espacio-temporales de la precipitación y la temperatura para el futuro. Para simular estos comportamientos, que son modificados por los cambios en el sistema climático inducidos por el calentamiento global, debido a la mayor cantidad de gases de efecto invernadero, se usan modelos acoplados de la circulación general atmósfera-océano corridos para diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero (Martelo, 2004).

Un taller de expertos en meteorología y climatología, definió los escenarios climáticos y seleccionó los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero y los modelos usados para el análisis climático. El escenario SRES-A2, es usado para cambios climáticos intermedio y pesimista y SRES-B1 para un cambio climático optimista. El escenario optimista es el que simula menores cambios en la temperatura y la precipitación, mientras que el escenario pesimista es el que simula los mayores cambios de estas variables en el futuro.

Según la opinión de los expertos, para nuestro país se espera un

aumento de la temperatura media, debido principalmente a un aumento de las temperaturas nocturnas, así como una disminución de la precipitación, acompañada por un incremento de eventos extremos (Martelo, 2003).

Se usaron los modelos UKTR, desarrollado por el *United Kingdom Meteorological Office* (Inglaterra) y el CCC-EQ, desarrollado por el *Canadian Center for Climate Modelling and Analysis* (Canadá). Estos modelos simulan el cambio promedio de temperatura y precipitación para lapsos de 30 años. En la tabla 15, se especifican los escenarios climáticos, lapsos y modelos de circulación global de la atmosfera usados en la Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela (Martelo, 2003).

Escenarios Climáticos			
Escenarios de emisión de gases por efecto invernadero	Optimista	Intermedio	Pesimista
		SRES-B1	SRES-A2
Sensitividad Climática	Baja (1.5°C)	Media (2.5°C)	Alta (4.5°C)
Periodos	2005-2035 (centrado en 2020)	2005-2035 (centrado en 2020)	2005-2035 (centrado en 2020)
	2025-2055 (centrado en 2040)	2025-2055 (centrado en 2040)	2025-2055 (centrado en 2040)
	2045-2075 (centrado en 2060)	2045-2075 (centrado en 2060)	2045-2075 (centrado en 2060)
Modelos	UKTR y CCC-EQ	UKTR y CCC-EQ	UKTR y CCC-EQ

Tabla 15: Escenarios de cambio climático en Venezuela (Martelo, 2004).

Ambos modelos simulan un incremento de la temperatura y para la lluvia la incertidumbre es mucho mayor, ya que un modelo simula un futuro más lluvioso y otro un futuro más seco para Venezuela.

3.8.1.- Cambios en los patrones de temperatura para el año 2060

Para la temperatura en general, el modelo CCC–EQ simula menores cambios que el UKTR, tanto en el escenario optimista (para el año 2060 no superan los 0,7°C y los 1,3°C respectivamente), como en el escenario pesimista (para el 2060 alcanzan los 1,9°C y 3,8°C respectivamente). El modelo UKTR simula incrementos de temperatura especialmente hacia el sur del país (Amazonas, grilla 8 y sur de Bolívar, grilla 9, ver Figura 24) (Martelo, 2004).

3.8.2.- Cambios en los patrones de precipitación para el año 2060

El modelo británico UKTR, simula menos precipitación en todo el país durante todo el año, excepto durante el trimestre de Marzo-Mayo, mientras que el modelo canadiense CCC–EQ, simula un futuro más lluvioso al norte del paralelo 10° N en varios trimestres y el total anual.

En la figura 24, se muestran los signos de los cambios de precipitación para los periodos trimestral y anual para cada grilla del país, donde los signos son consistentes para todos los escenarios climáticos, en los tres lapsos analizados.

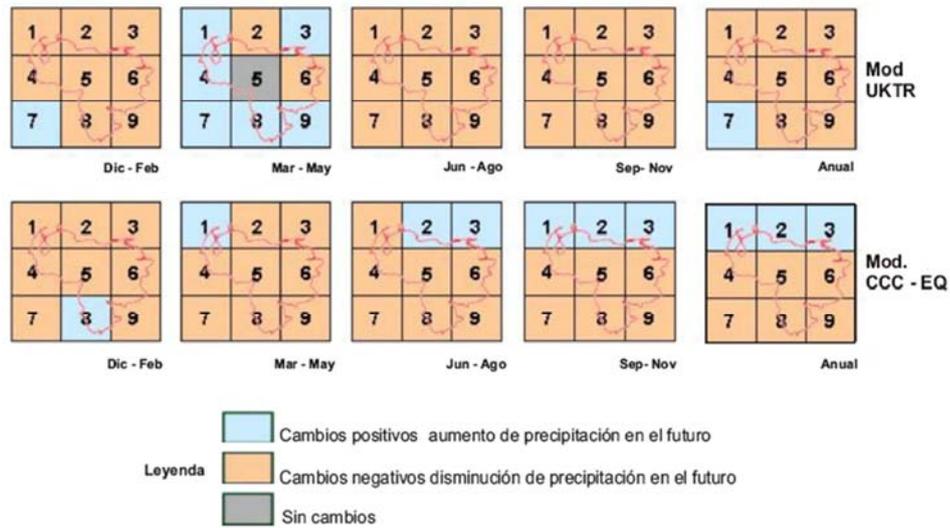


Figura 24: Representación esquemática del signo de cambio de la precipitación, según los modelos UKTR y CCC-EQ (Martelo, 2004).

En la figura 24, se observa que aunque ambos modelos apuntan a un futuro en general más seco, simulan mayor precipitación en algunas grillas en algún momento del año. Ambos modelos simulan adecuadamente el efecto de El Niño en el país, donde el trimestre correspondiente a la temporada seca (Dic-Feb) usualmente es más seco que lo normal.

El CCC-EQ simula al norte del país un ligero incremento de la lluvia (+7,4% en el escenario pesimista en 2060), mientras que en la grilla 4, correspondiente a la parte Andina, es donde simula un futuro más seco (-19,4% en el escenario pesimista). El UKTR tiene en general valores de cambio mayores; las zonas que simula como más afectadas son las grillas 5, 6 y 9 (los Llanos centrales y orientales, el Delta y el sur de Bolívar), con valores de -22% a -27% en el escenario pesimista, mientras que el efecto simulado en los Andes es mínimo.

Es al norte del país donde los modelos más difieren; simulando el UKTR un futuro más seco y el CCC-EQ un futuro más lluvioso. Considerando la

variabilidad temporal, el trimestre de entrada de aguas Marzo–Mayo, es el que presenta mayores diferencias: el UKTR lo simula en general como lluvioso, mientras que el CCC–EQ lo simula seco.

Ambos modelos coinciden en señalar un futuro más seco desde Junio hasta Febrero en toda la franja central del país, desde los Andes hasta los Llanos Orientales y norte de Bolívar, así como en el extremo sur de Bolívar y extremo norte del Zulia (Martelo, 2004).

Para la aplicación del modelo MOMOS, sobre la respuesta de la MOS a escenarios de cambio climático en Venezuela, se usará el escenario pesimista (centrado en el año 2060) en el que las temperaturas aumentan 4,5 °C, mientras que la precipitación disminuye en un 19,4% por cada evento diario de lluvia, según el modelo CCC-EQ para la parte andina de Venezuela, para analizar la influencia del cambio climático sobre la dinámica del C_{total} para cada sitio de estudio.

Primero, se debe calcular la humedad del suelo, utilizando el modelo SAHEL, para calcular el factor de respuesta a la humedad con los cambios propuestos en el escenario pesimista, para la parte andina. Para analizar el efecto del cambio propuesto en la función de respuesta al clima sobre la descomposición de la paja.

Luego, en un primer ejercicio, se simulará el efecto del cambio climático sobre la descomposición de la paja marcada, considerando la misma cantidad de paja marcada que fue utilizada en el experimento de campo pero modificando los valores de las funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo.

En un segundo ejercicio, se intenta visualizar el efecto del cambio climático sobre la materia orgánica total del suelo. Con este fin se asume

que la necromasa que entra a cada ecosistema es similar a la paja de trigo y la entrada anual de necromasa necesaria es calculada para mantener el nivel de materia orgánica medida en cada sitio bajo las condiciones climáticas actuales. Luego, se cambian las condiciones climáticas y se corre el modelo durante 64 años para analizar los cambios en los diferentes compartimientos. Esta aplicación supone que en el escenario de cambio escogido los aportes de necromasa se mantienen iguales.

Capítulo IV: Análisis de los Resultados

4.1.- Simulación de la precipitación diaria para Tovar y Gavidia

Para generar la precipitación diaria de Tovar y Gavidia, en base a los valores de precipitación mensual calculados por regresión con las estaciones cercanas, se realizaron 2000 corridas del simulador de lluvia markoviano (Ablan, 2007) para cada uno de los sitios. Este simulador calcula la lluvia diaria pero la suma por mes puede diferir de la media mensual estimada para el sitio. Para evitar este problema y que las medias mensuales simuladas y estimadas coincidan se calculó para cada corrida la raíz del error cuadrático medio ($\%RMSE$) considerando las medias mensuales estimadas y producidas por el simulador diario escogiéndose la de menor $\%RMSE$ de las 2000 simulaciones realizadas. En las figuras 25 y 26 pueden visualizarse las corridas seleccionadas en forma de gráficos temporales e histogramas de frecuencia, para dar una visión más detallada de la simulación.

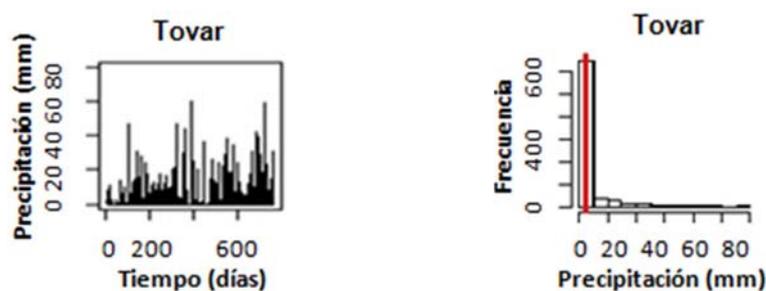


Figura 25: Gráfico temporal e histograma de frecuencia de la precipitación diaria generada para Tovar.

La figura 25, muestra el gráfico temporal con la distribución de la precipitación, observándose dos periodos de sequía característicos del clima de Tovar a lo largo del periodo de estudio. De igual manera, el histograma de frecuencia muestra la precipitación simulada la cual esta

agrupada en intervalos de 5 mm, observándose una mayor frecuencia de las lluvias en el intervalo entre 0-5 mm. La línea roja vertical representa el promedio de precipitación de los valores simulados.

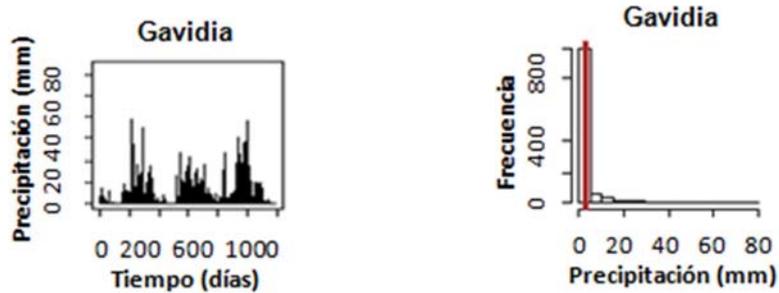


Figura 26: Gráfico temporal e histograma de frecuencia de la precipitación diaria generada para Gavidia.

En la figura 26, se muestra para Gavidia el gráfico temporal con la distribución de la lluvia a lo largo del periodo de estudio, donde también se observan marcadamente los periodos secos y húmedos, característicos del clima de alta montaña tropical y en el histograma de frecuencias se observa que los eventos de lluvia se encuentran en el intervalo de 0-5 mm. En la tabla 16, se muestra el promedio real de los valores diarios de precipitación (mm) de las estaciones Tovar y Gavidia, que no correspondían a los periodos de estudio y el promedio simulado de los valores diarios de precipitación (mm) generados con el simulador de lluvia markoviano.

Sitios	Promedio Real de Precipitación (mm)	Promedio Simulado de Precipitación (mm)	%RMSE
Tovar	2,89	2,89	5,41
Gavidia	3,26	3,25	8,76

Tabla 16: Valores del %RMSE de las corridas seleccionadas para Tovar y Gavidia.

El %*RMSE* indica que el ajuste entre los datos simulados y reales para ambos sitios fue excelente, según la valoración del estadístico (Jamieson et al., 1991). En resumen, estas corridas seleccionadas serán utilizadas por el modelo SAHEL para el cálculo de la humedad diaria del suelo de los sitios.

4.2.- Calibración del modelo SAHEL

Una vez obtenida la precipitación diaria de los diversos sitios de estudio, se procedió a calibrar el modelo SAHEL, para obtener la humedad diaria del suelo que se necesita para la validación del modelo MOMOS. Esta calibración se realizó seleccionando los valores de los parámetros del modelo que mejor reprodujeran el agua medida en el suelo en los diez puntos de muestreo. Primero, se identificaron los parámetros del modelo SAHEL que se relacionan con las propiedades físicas del suelo y de la vegetación, los cuales se calibraron de manera independiente, para identificar los más sensibles del modelo, es decir, los de menor *Payoff* (mejor ajuste con los datos medidos). El grupo de parámetros que se seleccionó para la calibración se indica en la tabla 17.

Parámetros	Definición
Lai	Índice de área foliar (m^2/m^2).
BI	Relaciona la cobertura del suelo con la radiación interceptada.
Parnonl	Relaciona la evaporación con la humedad del suelo
Kc	Coeficiente de cultivo
Wcwp	Contenido de humedad en el punto de marchitamiento (cm^3/cm^3).
Wcfc	Contenido de humedad a capacidad de campo (cm^3/cm^3).
Wcad	Contenido de humedad del suelo secado al aire (cm^3/cm^3).

Tabla 17: Parámetros a calibrar del modelo SAHEL.

Luego, se calibraron en conjunto para obtener el mejor ajuste de estos parámetros con respecto a sus valores iniciales. Los resultados de la calibración del modelo SAHEL para los diferentes sitios se muestran en la

tabla 18. No se discutirá el significado de los diferentes parámetros o los valores encontrados en los diferentes sitios por escapar del objetivo de este estudio.

Parámetros	Vigía	Barinas	Tovar	Santa Rosa	Gavidia	Banco
Lai	1	1.3943	2.7055	1	3.9153	3.53
BI	0.75	0.7945	0.9256	0.9473	0.7269	1
Parnonl	2.39	1	1	1	1	5
Kc	1	1.1823	0.8513	1.4062	1.5548	0.9760
Wcwp	0.1629	0.0233	0.1	0.2968	0.1809	0.0710
Wcfc	0.3782	0.1469	0.2138	0.3771	0.3567	0.2142
Wcad	0.0593	0.0208	0.01	0.01	0.1536	0.0415

Tabla 18: Parámetros calibrados del modelo SAHEL que permiten el mejor ajuste entre el agua simulada en la primera capa del suelo (0-10 cm) y los valores de humedad medidos en las bolsitas de descomposición.

Con estos valores calibrados, se corrió de nuevo el modelo SAHEL para obtener los valores de humedad diaria para la primera capa de suelo, definida con un espesor de 0-10 cm, ya que en ella se ubicaron las bolsitas de descomposición.

Seguidamente, se calculó el porcentaje de la raíz del error cuadrático medio ($\%RMSE$) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NS) como métodos estadísticos, para medir la bondad de ajuste de la salida del modelo con respecto a la humedad medida en los diez muestreos realizados durante el experimento de campo. Los resultados de estos estadísticos se muestran en la tabla 19.

Sitios	%RMSE	NS
El Vigía	27.42	0.02
Barinas	13.82	0.96
Tovar	38.11	0.40
Santa Rosa	22.36	0.69
Gavidia	7.44	0.94
El Banco	31.76	0.51

Tabla 19: Evaluación de la bondad de ajuste entre los datos de humedad del suelo simulados para la primera capa (0-10 cm) por el modelo SAHEL y los datos medidos en campo utilizando como indicadores %RMSE y NS en los seis sitios bajo estudio.

La valoración del %RMSE muestra que Gavidia tuvo el mejor ajuste entre los valores de humedad simulados y medidos, con un valor menor al 10% la simulación se considera Excelente, seguido de Barinas con una valoración Buena, ya que su resultado se ubica entre 10% y 20%, el Vigía y Santa Rosa con una valoración Regular, ya que sus resultados se ubican entre 20% y 30% y finalmente Tovar y el Banco con una valoración Mala, ya que el %RMSE es mayor al 30%.

De igual manera el NS, indica que la calibración del modelo SAHEL para Barinas y Gavidia fue buena, con más del 90% de la varianza de los datos explicada por el modelo, mientras que para Tovar, Santa Rosa y el Banco no fueron muy buenas y finalmente El Vigía resulto deficiente, con un valor cercano a 0.

De las figuras 27 a 32 se muestra la humedad generada por el modelo SAHEL, para la primera capa de suelo.

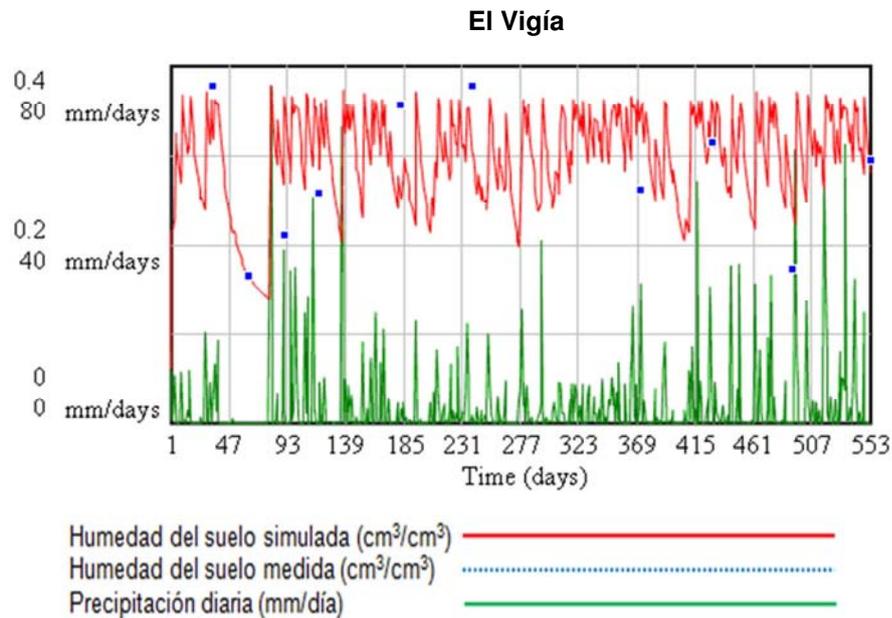


Figura 27: Humedad del suelo simulada para El Vigía con el modelo SAHEL previamente calibrado.

En la figura 27, se observa que los valores obtenidos por el modelo SAHEL para El Vigía se adaptan a los valores medidos de humedad, ya que al inicio se muestra una humedad alta, la cual se mantiene hasta que se termina el periodo lluvioso, momento en el cual comienza a disminuir la humedad del suelo, comportamiento que se mantiene a lo largo de todo el periodo de sequía y aumenta abruptamente al comenzar las lluvias, a partir de este momento el valor de la humedad simulada se mantiene cerca de la capacidad de campo (0.3782 cm³/cm³), con ligeras fluctuaciones debido a la variación de la frecuencia o magnitud de las lluvias, observándose que el modelo es sensible a la variación de la precipitación.

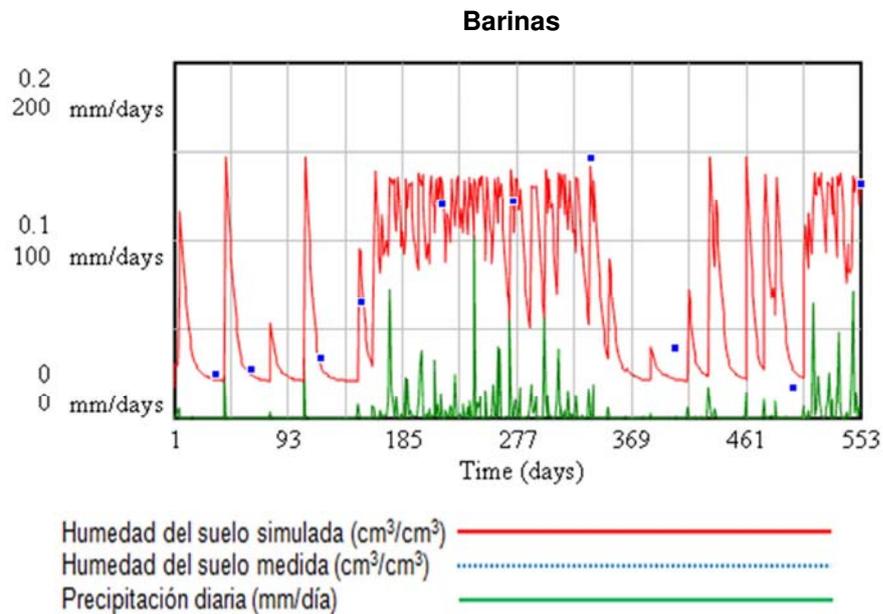


Figura 28: Humedad del suelo simulada para Barinas con el modelo SAHEL previamente calibrado.

Para Barinas, la figura 28 muestra un comportamiento muy diferente al de El Vigía, ya que en esta localidad el periodo seco está bien marcado, con periodos largos en que la humedad del suelo se mantiene baja, dinámica que es simulada correctamente por el modelo SAHEL.

Durante la época seca se observan aumentos puntuales de la humedad que siguen a eventos aislados de lluvia, en particular cuatro días de lluvia durante el primer período de sequía, luego la humedad va aumentando progresivamente a medida de que aumenta la frecuencia de las lluvias hasta alcanzar un valor cercano a la capacidad de campo (0.1469 cm³/cm³) hasta disminuir nuevamente en el siguiente periodo de sequía y aumenta al comienzo de un nuevo periodo lluvioso.

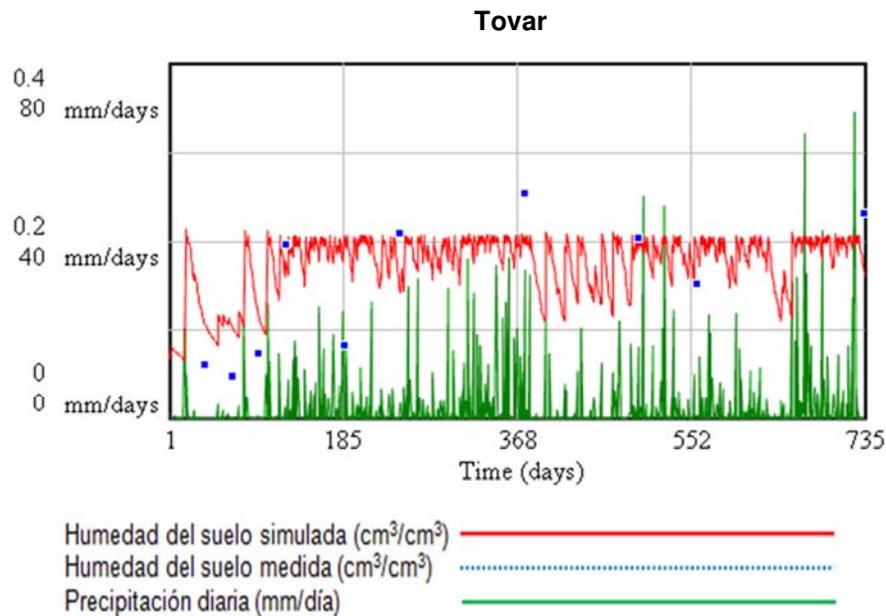


Figura 29: Humedad del suelo simulada para Tovar con el modelo SAHEL previamente calibrado.

Para Tovar en la figura 29, se observa que los valores simulados reflejan la presencia de dos periodos secos, el primero más severo que el segundo, en el cual se presentaron varios eventos de lluvia que hicieron fluctuar el agua en el suelo.

El ajuste con los datos medidos no es del todo bueno, observándose que las medidas durante la primera época seca están por debajo de la humedad simulada, luego se mantiene al ritmo de la magnitud y frecuencia de las lluvias alcanzando valores cercanos a la capacidad de campo (0.2138 cm³/cm³).

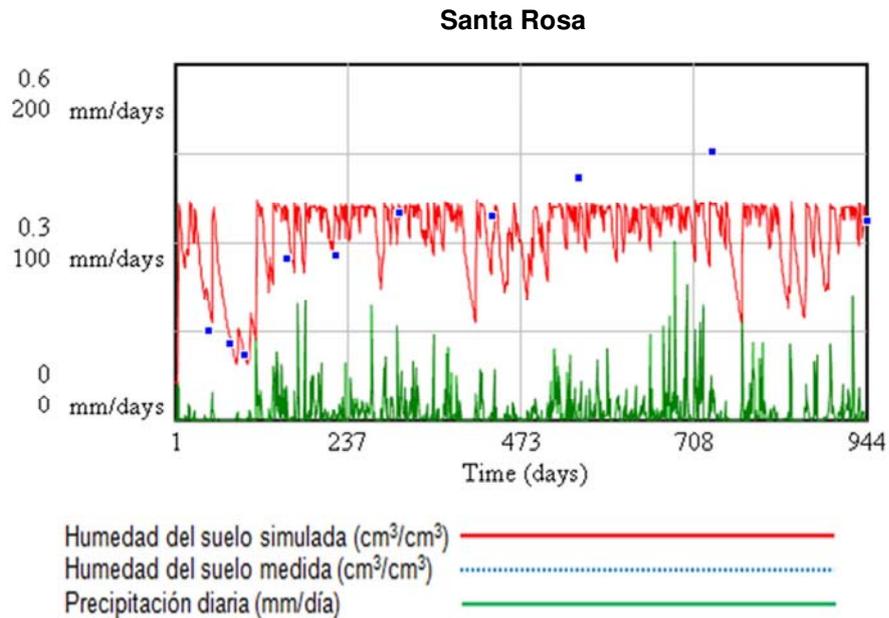


Figura 30: Humedad del suelo simulada para Santa Rosa con el modelo SAHEL previamente calibrado.

En la figura 30 se observa que en Santa Rosa, sitio correspondiente a las condiciones ecológicas de Selva Nublada, los valores simulados van acorde con la dinámica de los valores medidos, con una corta estación seca el primer año y luego oscilaciones menos marcadas de la humedad que se mantiene en general bastante cerca de la capacidad de campo (0.3772 cm³/cm³).

El valor máximo de humedad medido, de 0.4516 cm³/cm³ ocurrió debido a una lluvia de 100.4 mm ocurrida el día 20-01-1997, que llevó al suelo a condiciones de saturación, superando el valor de capacidad de campo.

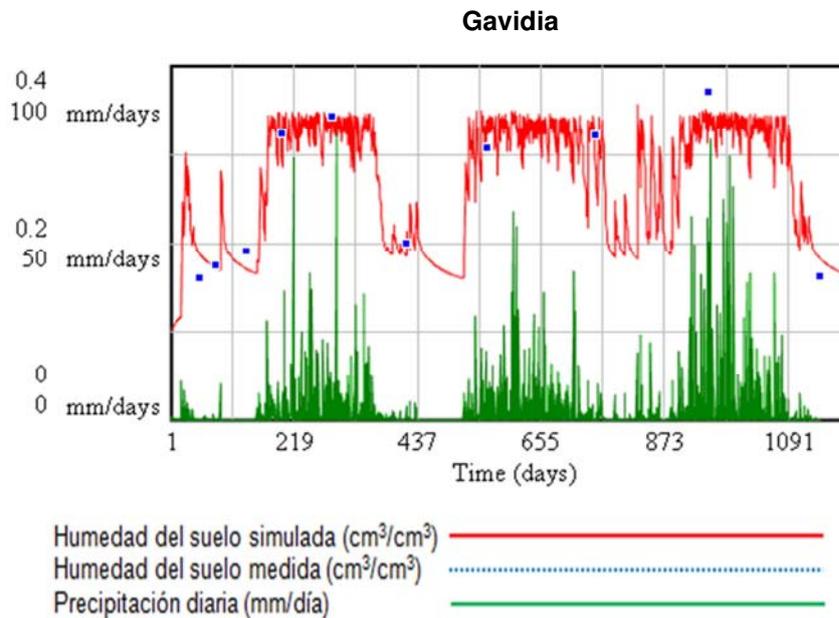


Figura 31: Humedad del suelo simulada para Gavidia con el modelo SAHEL previamente calibrado.

Para Gavidia, se muestra en la figura 31 que los valores arrojados por el modelo simulan muy bien la secuencia de periodos secos y húmedos para los tres años del estudio.

Donde los valores medidos tienen un buen ajuste con los valores de precipitación, ya que los mismos siguen las dinámicas de las magnitudes y frecuencias de las lluvias durante los periodos de sequía y lluviosos, hasta alcanzar un máximo valor de humedad de $0.3712 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, momento en el que desciende debido a la baja cantidad de lluvia.

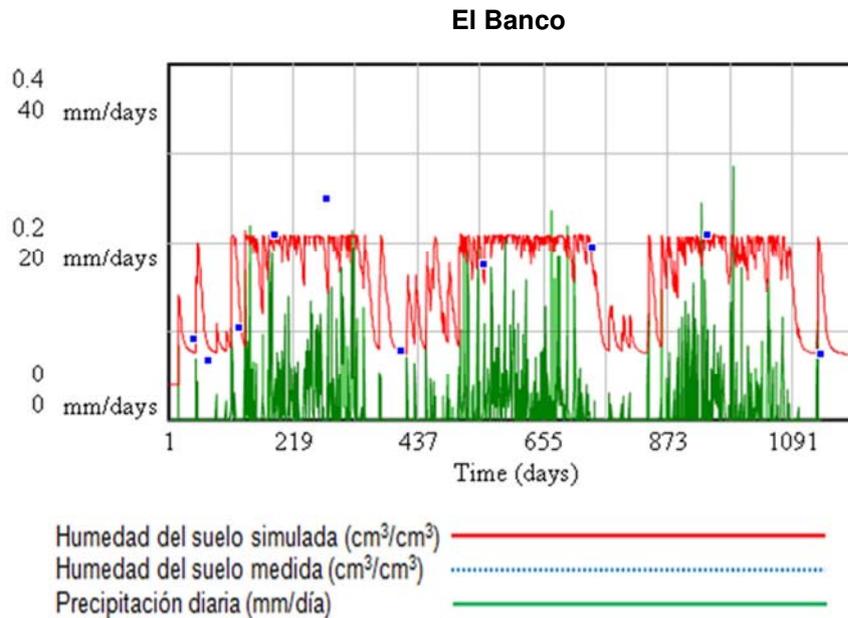


Figura 32: Humedad del suelo simulada para el Banco con el modelo SAHEL previamente calibrado.

Para El Banco, se observa en la figura 32 que al igual que en Gavidia la simulación de la alternancia de periodos secos y húmedos durante los tres años de estudio es muy clara, con una buena concordancia con los valores medidos.

El quinto punto de humedad de medida en campo presenta un valor muy alto (*outlayer*), bastante por encima de la capacidad de campo (0.2142 cm³/cm³), probablemente porque el suelo fue colectado en condiciones de saturación, poco tiempo después de una lluvia, y el modelo no simula estos periodos de saturación ya que drena instantáneamente hacia la capa inferior el agua que excede la capacidad de campo.

4.3.- Cálculo de las funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo para el modelo MOMOS

Estas funciones de respuesta vienen dadas por dos variables climáticas, temperatura diaria y humedad diaria del suelo, las cuales influyen a todas las constantes de velocidad del modelo permitiendo incluir el efecto del clima de cada sitio sobre la dinámica de la descomposición simulada por el modelo MOMOS. Estas funciones se describen a continuación.

4.3.1.- Función de respuesta a la temperatura f_t

Se calcula a partir de la temperatura diaria en °C de cada sitio de estudio. Los valores diarios que toma esta función en los diversos sitios de estudio se muestran en la figura 33, con valores muy cercanos a 1 en los sitios de baja altitud (El Vigía y Barinas) ya que las temperaturas promedio diarias de estos sitios se acercan a la temperatura óptima de 28°C utilizada en f_t no representando una limitación para la descomposición. Los valores de la función de temperatura disminuyen a medida que ascendemos hasta los sitios de mayor altitud como Gavidia y el Banco, dado que las temperaturas de estos sitios están muy por debajo de la temperatura óptima para la descomposición.

En la tabla 20, se observan los valores promedios de la función de respuesta a la temperatura, donde para Tovar la descomposición se reduce en aproximadamente un 20% por efecto de la temperatura, en Santa Rosa un 50% en promedio, en Gavidia un 70% y en El Banco un 80%. Esto quiere decir que por efecto de la temperatura, un material o residuo tarda 5 veces más en descomponerse en El Banco que en El Vigía.

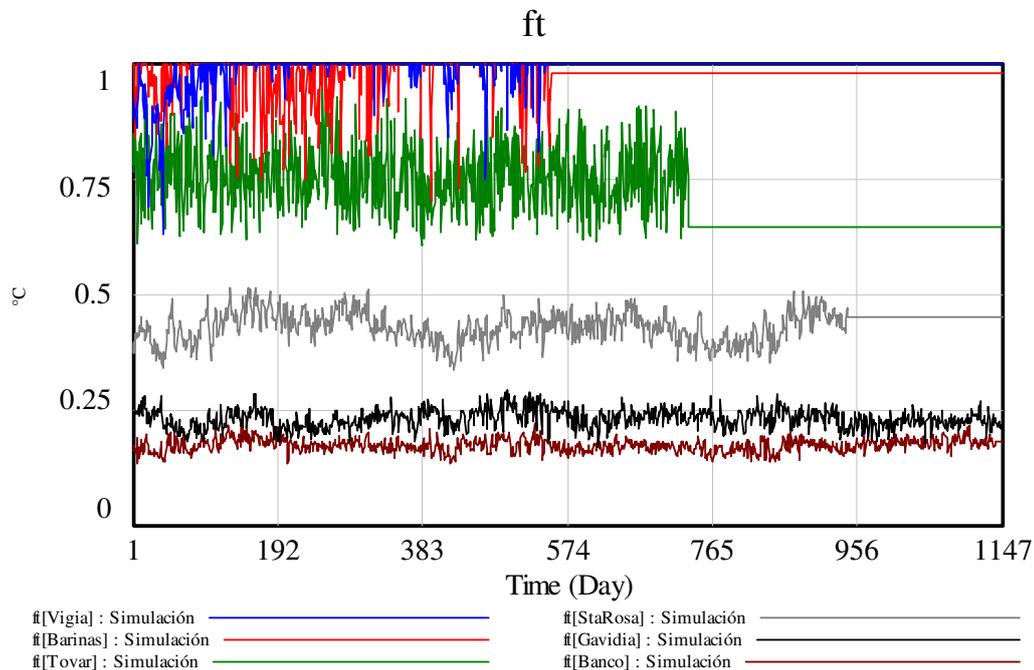


Figura 33: Valores diarios de la función de respuesta a la temperatura f_t en los seis sitios de estudio durante el periodo de incubación de la paja marcada.

4.3.2.- Función de respuesta a la humedad del suelo f_w

Se calcula a partir de la humedad diaria del suelo en cm^3/cm^3 , obtenida por el modelo SAHEL en cada sitio de estudio. La función f_w se acerca a 1 a medida que la humedad del suelo se acerca a la capacidad de campo de cada sitio. Puede observarse que los dos sitios de baja altitud, El Vigía y Barinas, que presentaban bastante similitud en su función de respuesta a la temperatura, se diferencian bastante en su respuesta a la humedad, con un valor promedio para El Vigía de 0,80 y para Barinas de 0,50, mientras que Tovar y Santa Rosa tienen en promedio casi los mismos valores de la función de respuesta a la humedad, al igual que Gavidia y El Banco. En resumen puede observarse que tres de los sitios son marcadamente estacionales, lo que impone una limitación importante a la

descomposición (Barinas, Gavidia, El Banco), mientras que los otros tres sitios son menos estacionales, como se muestra en la figura 34.

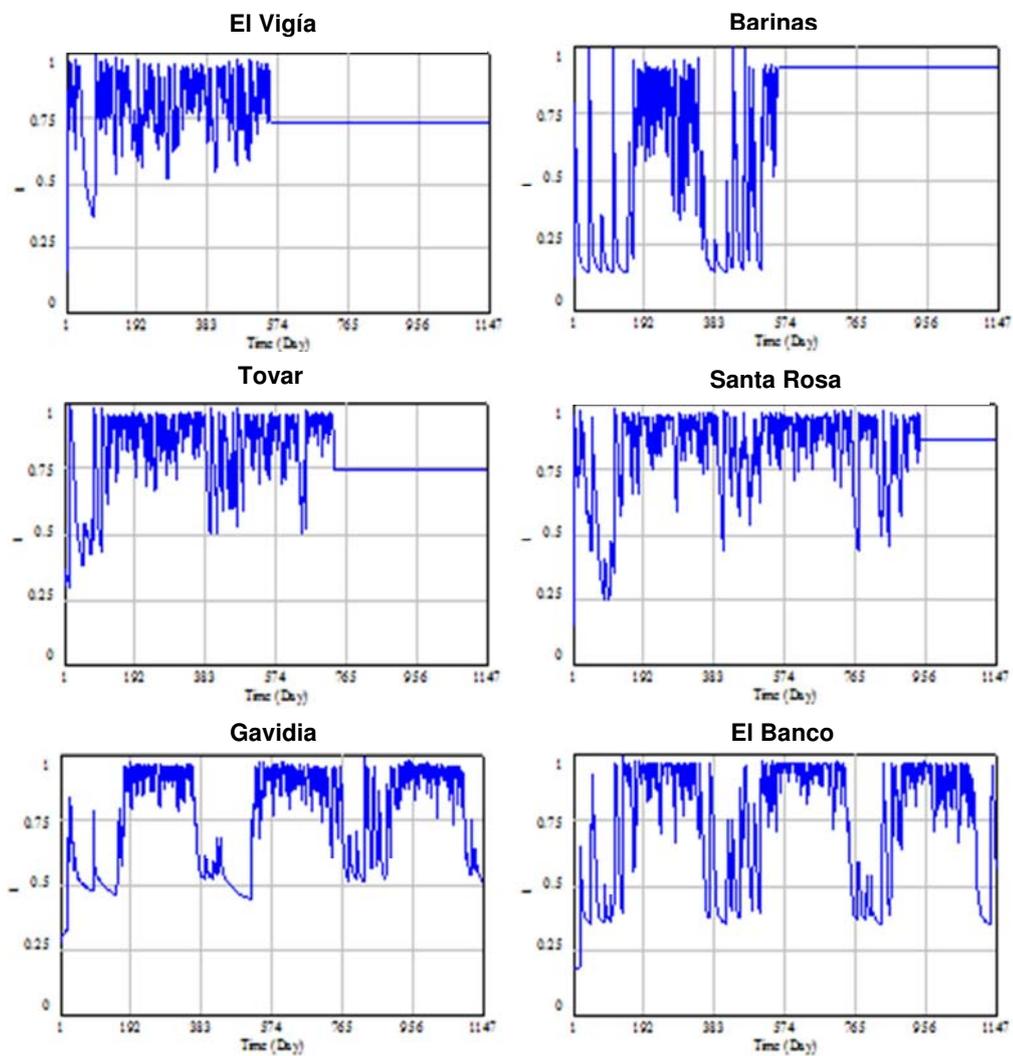


Figura 34: Valores diarios de la función de respuesta a la humedad del suelo f_w en los seis sitios de estudio, durante el periodo de incubación de la paja marcada.

En la tabla 20, se muestran a manera de resumen los valores promedios de la función de respuesta a la humedad del suelo para cada sitio de estudio.

Una vez obtenidas estas funciones de respuesta, se calculó la función de respuesta al clima, como producto de las funciones anteriores. Los valores diarios de la respuesta combinada a la temperatura y la humedad se muestran en la figura 35 para cada sitio de estudio y en la tabla 20 se presentan los valores promedios para el periodo de estudio de cada sitio.

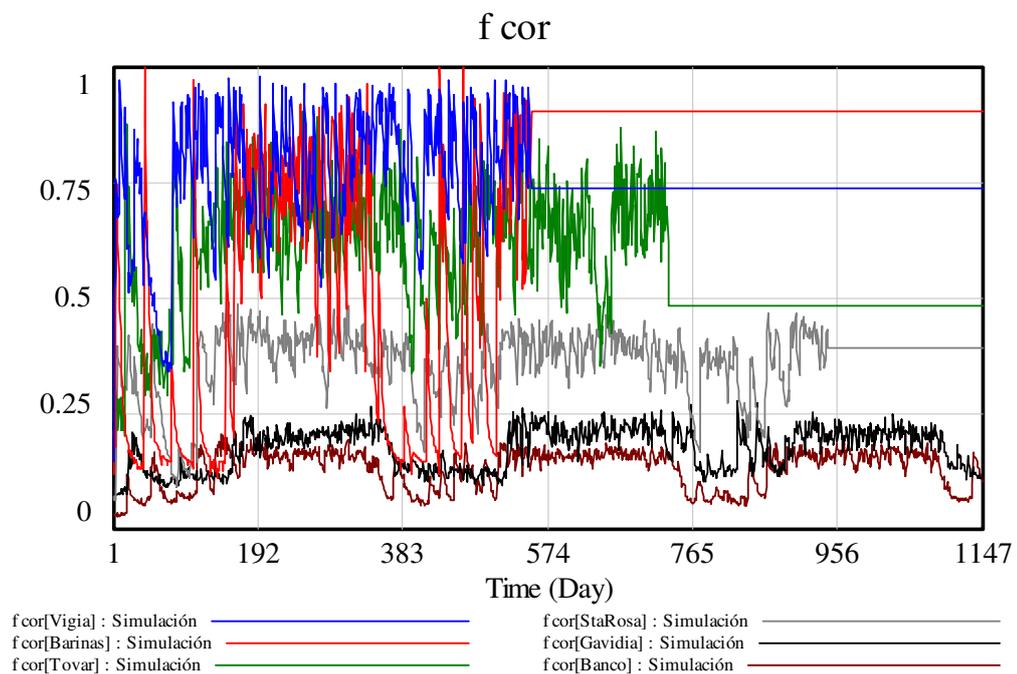


Figura 35: Valores diarios de la función de respuesta al clima en los seis sitios de estudio, durante el intervalo de incubación.

	El Vigía	Barinas	Tovar	Santa Rosa	Gavidia	El Banco
f_t	0,9760	0,9700	0,7556	0,4281	0,2299	0,1720
f_w	0,7842	0,4831	0,8126	0,8201	0,7515	0,7419
$f_t * f_w$	0,7654	0,4686	0,6140	0,3511	0,1727	0,1276

Tabla 20: Valores promedios de la función de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo durante todo el periodo del experimento de campo.

4.4.- Calibración de la tasa de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp})

Como se explicó en la metodología, una vez obtenidos los valores diarios de las funciones de respuesta f_t y f_w , el modelo fue corrido utilizando los valores de los parámetros que fueron calibrados por Pansu et al., (2004) y se recalibró únicamente la constante de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp}), a partir de un valor inicial de 0.03 dia^{-1} tomado también de Pansu et al., (2004) para obtener el mejor ajuste de este parámetro para cada sitio de estudio.

Esta calibración se realizó a partir de la función *Optimization* del programa Vensim® (con las mismas especificaciones para Vensim® usadas para la calibración del modelo SAHEL) y tomando como criterio el mejor ajuste simultáneo y el mismo peso a los datos de carbono total remanente y carbono en la biomasa microbiana medidos para cada sitio. Los resultados de esta calibración se muestran en la tabla 21.

Sitios	$k_{resp} \text{ (dia}^{-1}\text{)}$
El Vigía	0,029
Barinas	0,038
Tovar	0,034
Santa Rosa	0,030
Gavidia	0,021
EL Banco	0,022

Tabla 21: Valores calibrados de la constante de respiración microbiana (k_{resp}) para cada sitio de estudio, manteniendo los valores de los otros parámetros según Pansu et al., (2004), considerando los datos medidos de carbono total remanente y de carbono en la biomasa microbiana.

Luego, se realizó un análisis de regresión simple, para explorar la relación entre este parámetro (k_{resp}) y la textura del suelo, bajo la hipótesis de que una textura más fina implica mayor protección de la materia orgánica y por lo tanto menor constante de respiración. La figura 36 muestra los resultados de esta regresión, efectuada considerando la suma de arcilla y limo.

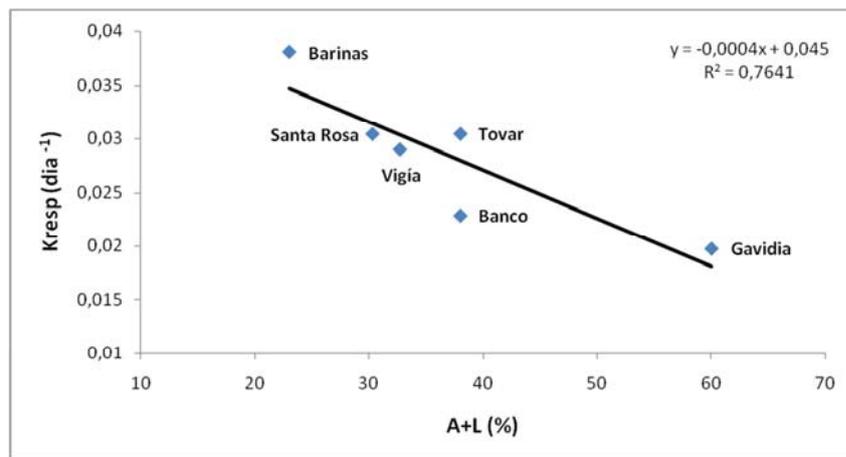


Figura 36: Relación de la constante de respiración microbiana (k_{resp}) con la textura del suelo (arcilla+limo) utilizando los valores de los seis sitios de estudio.

Se observa que existe una relación inversamente proporcional entre las variables, ya que a medida que aumenta la fracción fina del suelo disminuye el valor de la tasa de respiración de la biomasa microbiana para los 6 sitios de estudio, tal y como se esperaba.

Luego, se realizó una prueba de hipótesis sobre la pendiente de la recta a través de un análisis de varianza utilizando la prueba F (Keat y Young, 2009), para determinar el grado de significancia entre las variables estudiadas. Para esto se consideran las siguientes hipótesis.

H0: $b=0$, significa que no hay relación entre la variable k_{resp} y la variable textura debido a que la pendiente de la recta es cero.

H1: $b\neq 0$, significa que hay relación entre la variable k_{resp} y la variable textura debido a que la pendiente de la recta es diferente de cero.

Usando la ecuación 3.1 del marco metodológico, que determina el valor estimado de F , en base al coeficiente de correlación R^2 y con un valor $n=6$ y $k=1$, se obtuvo un valor estimado de $F=12,95$.

Luego, para conocer el nivel de significancia a usar en la prueba F , se calculó el valor p a través del programa estadístico Lenguaje R[®], cuyo valor es 0,02, el cual es menor al nivel de significancia comúnmente usado de 0,05 ($p<0,05$).

Usando este nivel de significancia y con 4 grados de libertad a través de la tabla de distribución F se obtiene un valor crítico de 7,70. Lo que indica, que se rechaza la hipótesis nula, ya que el valor de F estimado es mayor que el valor F crítico, afirmándose que existe una relación estadísticamente significativa entre la tasa de respiración de la biomasa microbiana y la textura del suelo con un 95% de confianza.

De igual manera, se realizó un análisis de regresión simple para modelizar la relación entre el k_{resp} y otras variables del suelo, encontrándose una relación significativa únicamente con el pH del suelo, como se muestra en la figura 37.

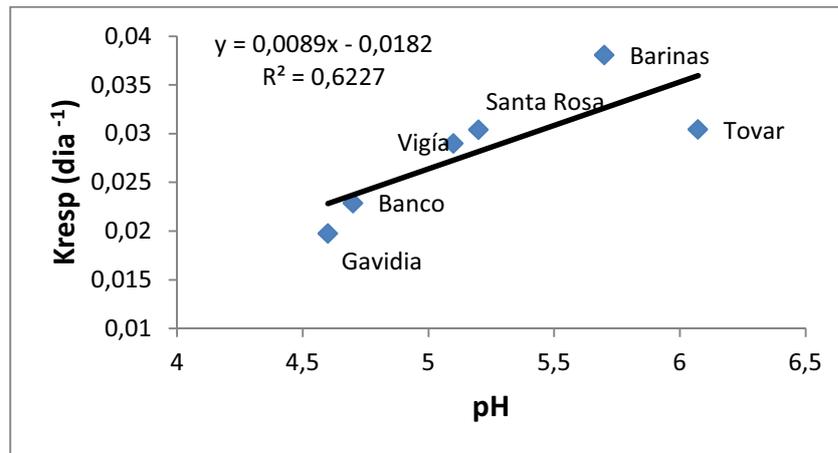


Figura 37: Relación entre la constante de respiración de la biomasa microbiana (k_{resp}) y el pH del suelo en los seis sitios de estudio.

En la figura 37, se observa que hay una relación directamente proporcional entre el K_{resp} y el pH del suelo, ya que a medida que aumentan los valores de pH aumentan también los valores de la tasa de respiración de la biomasa microbiana.

Al aplicar la prueba F , con hipótesis similares a las planteadas para la textura, se obtuvo un valor estimado de $F=6,60$. De igual manera, se calculó el valor p (0,06), el cual es mayor al nivel de significancia de 0,05, lo que indica que se debe usar un nivel de significancia mayor.

Usando un nivel de significancia de 0,1 y con 4 grados de libertad a través de la tabla de distribución F se obtiene un valor crítico de $F=4,54$, lo que indica que se rechaza la hipótesis nula, ya que el valor estimado es mayor que el valor crítico, afirmándose que existe una relación estadísticamente significativa entre la tasa de respiración de la biomasa microbiana y el pH del suelo con un 90% de confianza.

Estas dos relaciones estadísticamente significativas entre la constante de respiración de la biomasa microbiana con la textura del suelo y con el pH son muy importantes, ya que permiten estimar el valor de este parámetro, el único que varía entre los sitios, en función de dos variables edáficas muy fáciles de medir, lo cual es una ayuda muy importante para utilizar el modelo MOMOS en diferentes suelos.

4.5.- Validación del modelo MOMOS

Una vez calculada la función de respuesta al clima y los valores de la constante de respiración microbiana (k_{resp}) para cada sitio de estudio, se procedió a validar el modelo MOMOS, para dar cumplimiento con el objetivo general del estudio.

Esta validación consistió en comparar los valores medidos de carbono de la biomasa microbiana y el carbono total con los valores arrojados por el modelo. Se realizó una simulación para cada variable. Los resultados de esta validación se muestran en las figuras 38 y 39.

En la tabla 22 se muestra la estadística aplicada para la validación del modelo MOMOS, a través del porcentaje de la raíz del error cuadrático medio ($\%RMSE$) y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NS).

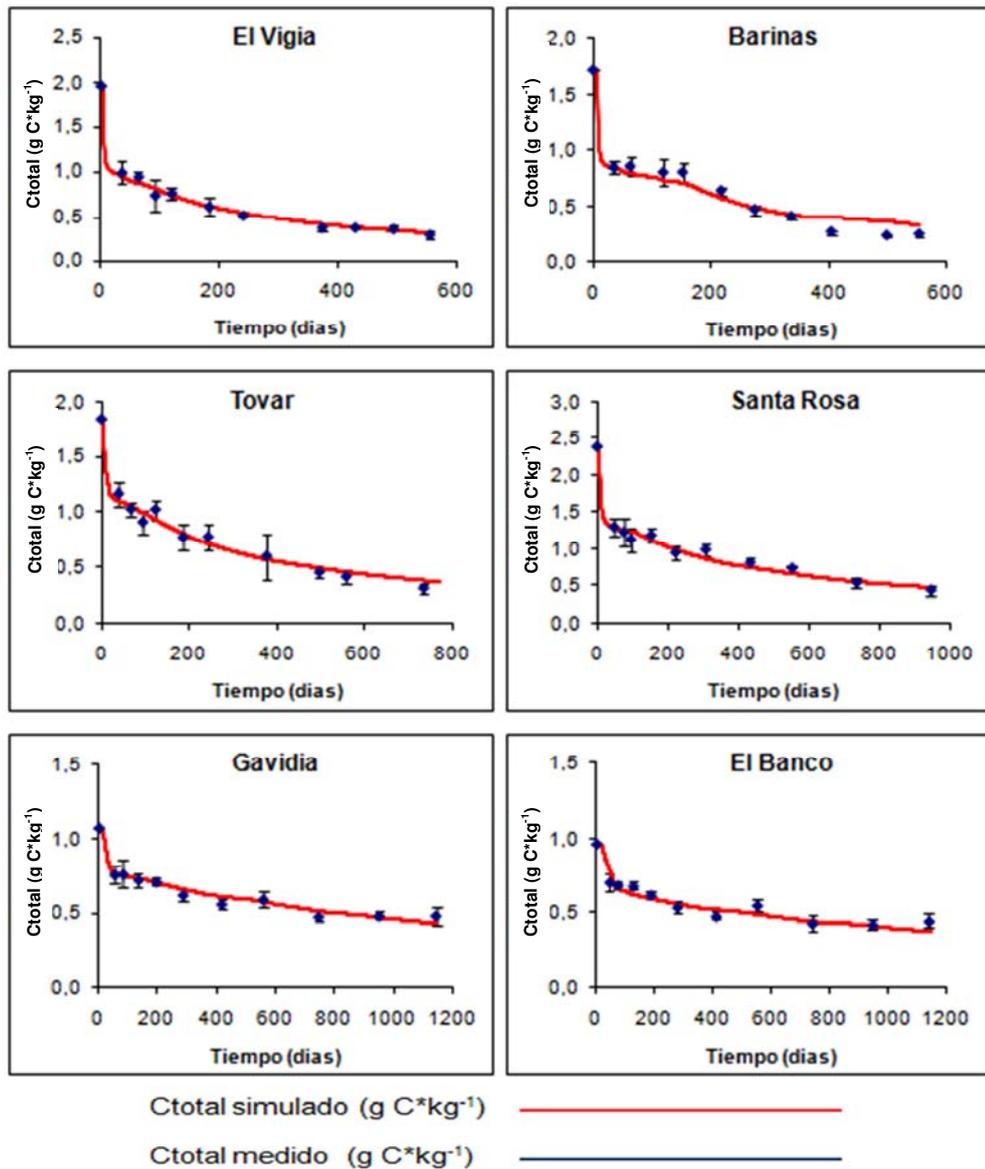


Figura 38: Simulación por el modelo MOMOS del C_{total} y datos medidos en el experimento de campo. Se muestra el promedio y la desviación estándar de las cuatro réplicas de campo para cada muestreo.

La figura 38 muestra que en general el C_{total} simulado para los seis sitios se ajusta bastante bien a los datos medidos en el experimento de campo. Se calcularon las desviaciones estándar de los diez puntos medidos en

función de la cuatro replicas de campo para cada muestreo, observándose que los valores simulados están bastante cercanos a la media de los valores medidos.

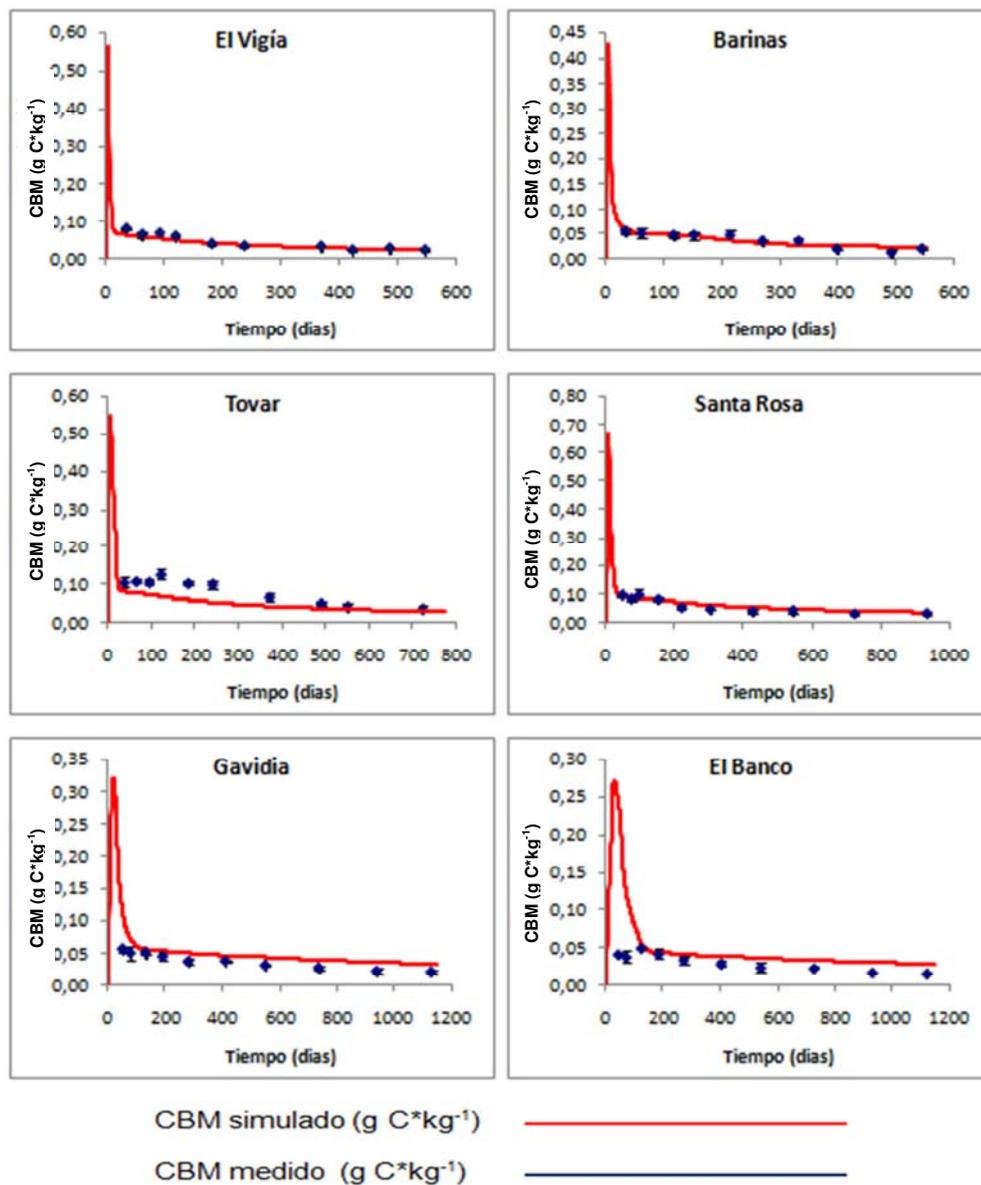


Figura 39: Simulación por el modelo MOMOS del C_{BM} y datos medidos en el experimento de campo. Se muestra el promedio y la desviación estándar de las cuatro réplicas de campo para cada muestreo.

Para el C_{BM} , en la figura 39 se observa que el ajuste entre los valores simulados y medidos no fue tan bueno como el del C_{total} . Al inicio de la descomposición se observa un pico, el cual se relaciona con el rápido consumo de la fracción lábil por parte de los microorganismos. Este pico no se puede verificar con los datos experimentales, ya que para El Vigía, Barinas, Tovar y Santa Rosa se presenta antes de la primera medición, mientras que para Gavidia y el Banco, el pico tarda más, ya que en estos sitios de altura el proceso de descomposición es más lento y no es verificado por los datos que muestran una biomasa menor que la simulada, por lo que pareciera que el mecanismo de simulación de la biomasa microbiana en esta primera etapa de la simulación no funciona correctamente o que pudieran existir errores metodológicos en la determinación del C_{BM} .

Sitios	C_{total}		C_{BM}	
	%RMSE	NS	%RMSE	NS
El Vigía	6,773	0.9716	20,6124	0.8058
Barinas	14,3217	0.8917	20,076	0.7729
Tovar	7,757	0.9563	42,3538	0.3374
Santa Rosa	6,8057	0.9476	15,8148	0.8674
Gavidia	4,7044	0.9277	52,5596	-17.186
El Banco	8,3733	0.7986	221,189	-383.286

Tabla 22: Evaluación de la bondad de ajuste entre los valores simulados por el modelo MOMOS y los datos medidos en campo utilizando el %RMSE y el NS para el C_{total} y el C_{BM} .

Los resultados de la tabla 22 para el carbono total, muestran que El Vigía, Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco dan un excelente resultado, ya que sus valores son menores al 10%, mientras que Barinas tuvo una buena valoración, ya que su resultado se ubica entre 10% y 20%, según la valoración del estadístico.

Por el contrario, los resultados del $\%RMSE$ muestran que Santa Rosa tuvo un buen ajuste entre los valores del carbono de la biomasa microbiana medidos y los valores arrojados por el modelo MOMOS, seguido de El Vigía y Barinas con una valoración Regular y Tovar con una valoración Mala. En los sitios de páramo, existe una gran dispersión entre los valores medidos y simulados y en consecuencia la valoración es Mala

De igual manera, el NS para el carbono total del sistema, tuvo un buen ajuste entre los valores simulados y observados para los seis sitios de estudio. Mientras que el NS , para el carbono de la biomasa microbiana, tuvo un buen ajuste para El Vigía, Barinas y Santa Rosa, ya que sus resultados son cercanos a 1, mientras que para Tovar, la predicción no fue precisa con respecto a la media de los datos observados, con un valor bajo y finalmente para Gavidia y el Banco, obtuvieron valores negativos, que indican que la media observada es mejor que la predicción del modelo.

En síntesis, con la aplicación de los estadísticos $\%RMSE$ y NS se puede afirmar que la dinámica de la BM no fue simulada satisfactoriamente en algunos sitios, lo que resulta paradójico dado que es el compartimiento central del modelo, mientras que el C_{total} tuvo un ajuste muy satisfactorio entre los valores simulados y los medidos en los seis sitios de estudio. Es decir que si bien la biomasa microbiana se simula con un éxito relativo, la dinámica del carbono total es simulada con mucha precisión considerando el clima de cada sitio y variando un solo parámetro.

A manera de resumen, en la figuras 40 y 41 se muestran un análisis de regresión lineal simple entre los valores medidos y simulados de las variables estudiadas para los seis sitios.

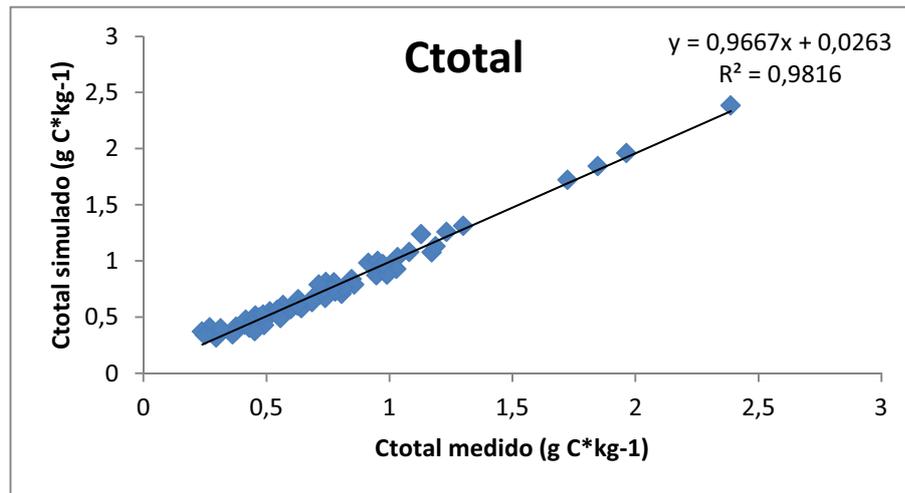


Figura 40: Valoración global de los diez valores medidos en el experimento de campo y los valores simulados que corresponden al tiempo en el que se realizaron las mediciones para el C_{total} de los seis sitios estudiados.

En la figura 40, se indica que de acuerdo al coeficiente de determinación R^2 , los datos simulados explican el 98,16% de la varianza de los datos medidos para el C_{total} , observándose un excelente ajuste de los datos para los seis sitios de estudio.

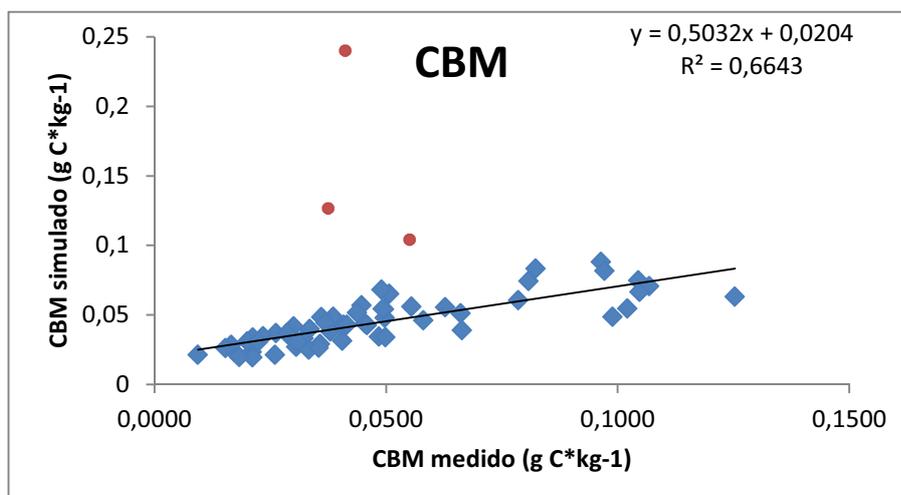


Figura 41: Valoración global de los diez valores medidos en el experimento de campo y los valores simulados que corresponden al tiempo en el que se realizaron las mediciones para el C_{BM} de los seis sitios estudiados.

En la figura 41, se observa que para el C_{BM} los datos simulados explican el 66,43% de la varianza de los datos medidos, observándose una buena relación lineal para los seis sitios, ya que se eliminaron los puntos rojos (*outlayer*) que corresponden a dos valores de El Banco y uno de Gavidia, los cuales se relacionan con los picos al inicio de la simulación de la biomasa microbiana para estos dos sitios.

Luego, en la figura 42 se muestran en general las dinámicas del carbono de los compartimientos del modelo MOMOS para los seis sitios de estudio. Se observa que la dinámica de descomposición del material vegetal (paja de trigo) para El Vigía, Barinas, Tovar y Santa Rosa son parecidas, mientras que para los sitios de páramo como Gavidia y el Banco las velocidades de descomposición son más lentas. Estas dinámicas están influenciadas por las constantes de descomposición, las cuales determinan las transferencias de carbono entre los

compartimientos, además de las funciones de respuesta a la temperatura y humedad del suelo.

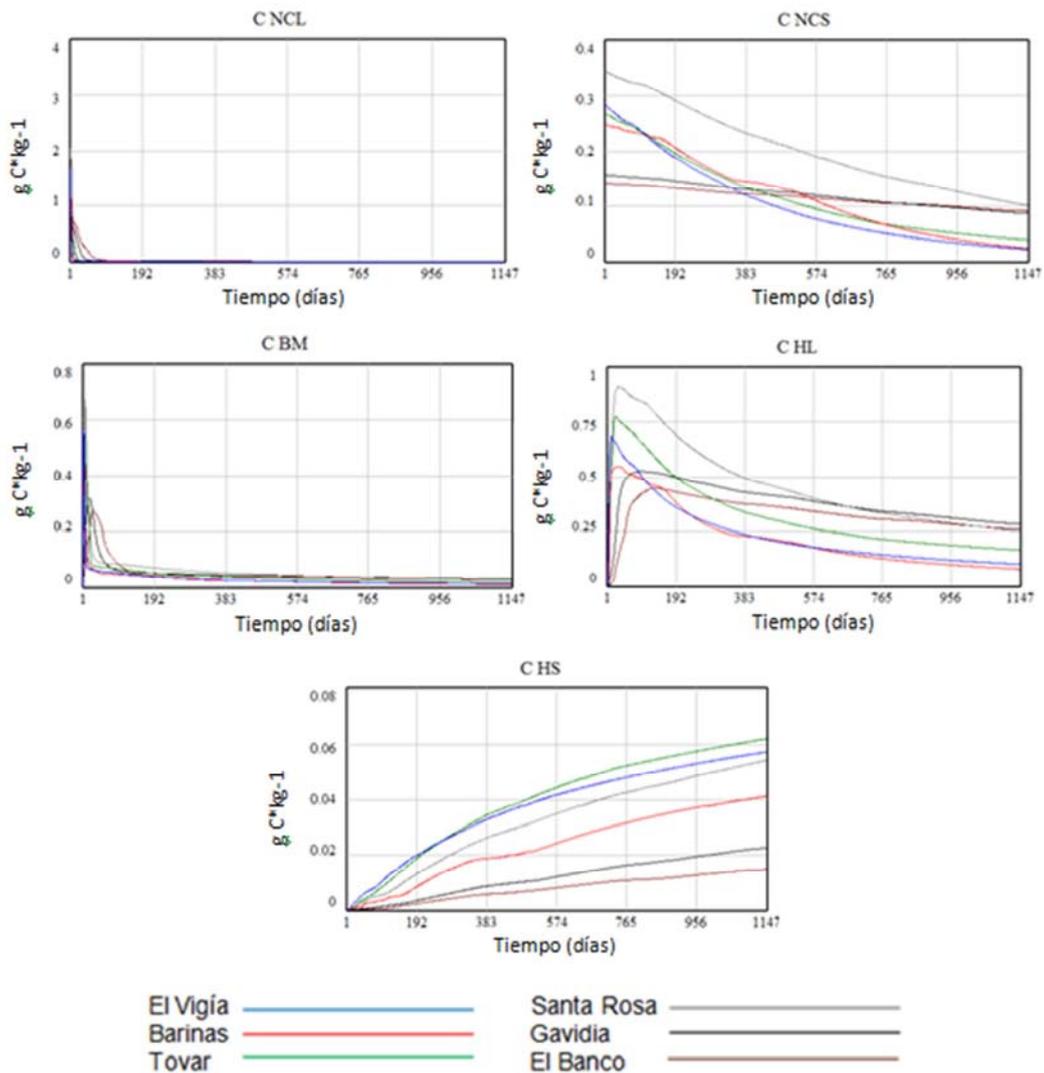


Figura 42: Simulación de la dinámica del carbono en los diferentes compartimientos del suelo para los seis sitios de estudio.

El carbono presente en el compartimiento de necromasa lábil (C_{NCL}), aumenta rápidamente el primer día de la simulación para los seis sitios, donde Santa Rosa alcanza un valor máximo de $2,053 \text{ g C*kg}^{-1}$, seguido del Vigía ($1,680 \text{ g C*kg}^{-1}$), Tovar ($1,581 \text{ g C*kg}^{-1}$), Barinas ($1,475 \text{ g C*kg}^{-1}$), Gavidia ($1,375 \text{ g C*kg}^{-1}$) y El Banco ($1,275 \text{ g C*kg}^{-1}$).

$C \cdot kg^{-1}$), Gavidia ($0,925 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) y el Banco ($0,832 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$), luego a partir de estos valores el carbono disminuye, ya que los microorganismos descomponen rápidamente el material vegetal que representa el 85,6% de la necromasa inicial que entra al sistema.

El carbono presente en el compartimiento de necromasa estable (C_{NCS}), disminuye lentamente a lo largo del tiempo, a partir del valor de $0,343 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$ para Santa Rosa, seguido del Vigía ($0,282 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$), Tovar ($0,266 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$), Barinas ($0,248 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$), Gavidia ($0,155 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) y el Banco ($0,140 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$), representando el 14,4% de la necromasa inicial. Las salidas de ambos compartimientos representan la entrada de la biomasa microbiana.

El carbono presente en el compartimiento de biomasa microbiana (C_{BM}) comienza a aumentar a partir del segundo día de la simulación, donde Santa Rosa al 8^{vo} día alcanza un valor máximo de $0,6673 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$, seguido del Vigía ($0,5619 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 3^{er} día, Tovar ($0,5455 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 5^{to} día, Barinas ($0,4272 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 6^{to} día, Gavidia ($0,32 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 20^{mo} día y el Banco ($0,2710 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 29^{no} día, luego a partir de estos valores disminuye el carbono, ya que los microorganismos no tienen más material vegetal para incorporar en su biomasa y desde este momento su actividad depende más de la descomposición del humus.

El carbono presente en el compartimiento de humus lábil (C_{HL}) aumenta lentamente a partir del tercer día para los seis sitios de estudio, donde Santa Rosa al 33^{ro} día alcanza un valor máximo de $0,9010 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$, seguido del Vigía ($0,6844 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 14^{to} día, Tovar ($0,8002 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 25^{to} día, Barinas ($0,5442 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 32^{do} día, Gavidia ($0,5335 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 97^{mo} día y el Banco ($0,4379 \text{ g } C \cdot kg^{-1}$) al 134^{to} día, luego de estos valores el carbono comienza a disminuir lentamente a lo largo del tiempo, debido

a que los microorganismos del suelo actúan intensamente sobre la materia orgánica.

El carbono presente en el compartimiento de humus estable (C_{HS}) comienza a aumentar lentamente a partir del 4^{to} día, donde Tovar llega a un valor máximo de 0,0660 g C*kg⁻¹ al final de la simulación, seguido del Vigía (0,0572 g C*kg⁻¹), Santa Rosa (0,0537 g C*kg⁻¹), Barinas (0,0410 g C*kg⁻¹), Gavidia (0,0230 g C*kg⁻¹) y el Banco (0,0144 g C*kg⁻¹), donde la materia orgánica se humifica bien, dando lugar a agregados estables que mejoran las condiciones físicas, químicas y biológicas de los suelos. Por esta razón el compartimiento de HS es el responsable de acumular carbono a largo plazo.

Finalmente, en la figura 43 se muestran los valores de la respiración de la biomasa microbiana ($Resp$), donde la respiración es mayor para Barinas con un valor de 0,2833 g C/kg*día, seguido de El Vigía (0,22 g C/kg*día), Santa Rosa (0,1632 g C/kg*día), Tovar (0,0767 g C/kg*día), Gavidia (0,0161 g C/kg*día) y El Banco (0,0094 g C/kg*día), lo que indica que la respiración no depende de la cantidad de biomasa, sino de las propiedades físicas y químicas del suelo, como se evidenció en la calibración de la tasa k_{resp} , además de los factores climáticos de cada sitio.

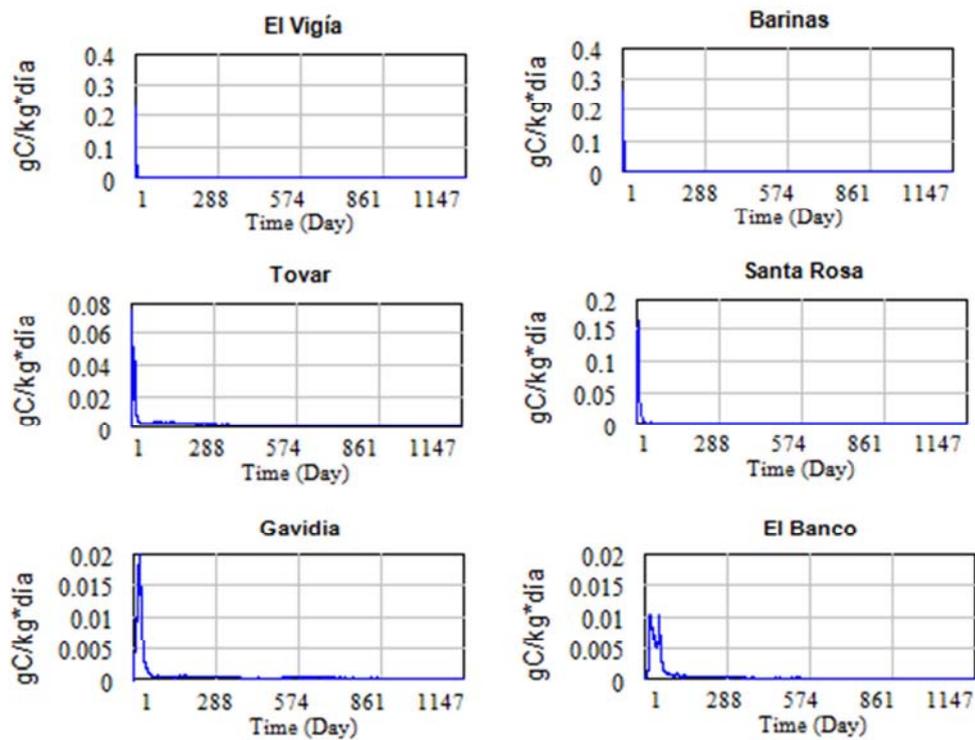


Figura 43: Dinámica de respiración de la biomasa microbiana por cada sitio en g C/kg*día.

4.6.- Aplicación del análisis de sensibilidad multivariable al modelo MOMOS

Se realizó un análisis de sensibilidad para Santa Rosa, ubicado a 1800 m, para evaluar que tan sensible es el modelo MOMOS ante un cambio del $\pm 10\%$ en el valor original de los parámetros que rigen la dinámica del carbono de los cinco compartimientos del modelo más la variable C_{total} , además se calculó el índice de sensibilidad (IS) en el tiempo final del análisis. Este análisis se realizó en Vensim[®] y se llevo a cabo para 200 simulaciones, usando la distribución uniforme aleatoria. Los resultados de este análisis se muestran en la tabla 23.

	k_l	k_s	k_{BM}	k_{hl}	k_{hls}	k_{hs}	k_{resp}
C_{NCL}	0	0	0	0	0	0	0
C_{NCS}	0	1,2263	0	0	0	0	0
C_{BM}	0,0375	0,0376	0,3195	0,2820	0,0376	0	0,6877
C_{HL}	0,0324	0,0446	1,3097	1,3059	0,0547	0,0020	0,6848
C_{HS}	0,1022	0,0559	1,0894	0,8998	0,9777	0,0093	0,5709
C_{total}	0,0327	0,2538	0,9125	0,8864	0,0878	0,0012	0,5128

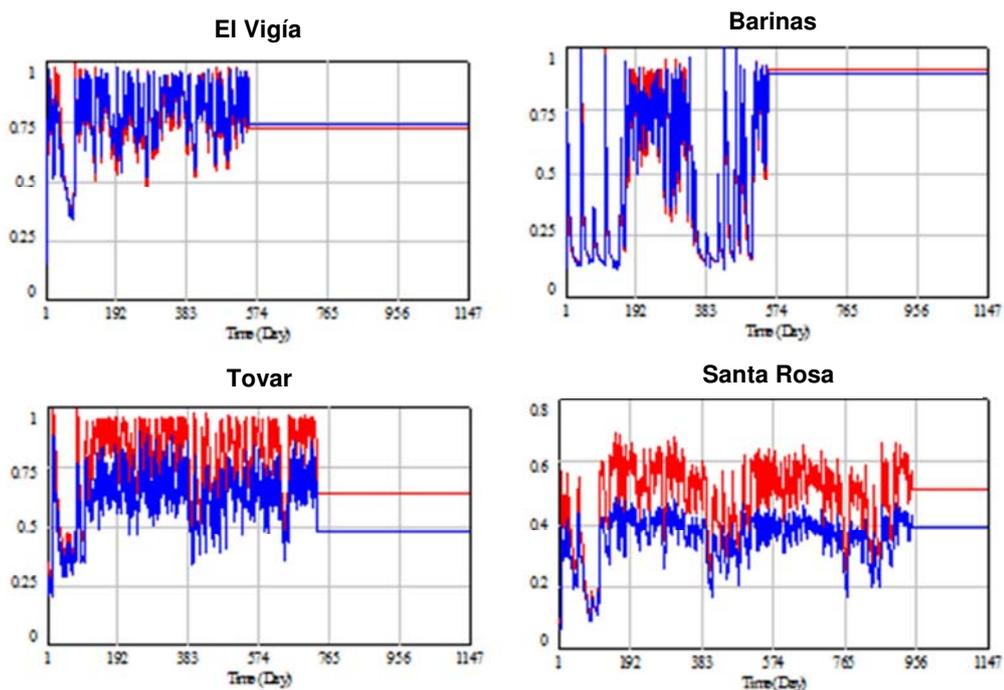
Tabla 23: Valores del índice de sensibilidad de los compartimientos con respecto a cambios de $\pm 10\%$ en los parámetros del modelo MOMOS en el sitio Santa Rosa. Cálculos realizados para el último día de la simulación (2.6 años).

Como se muestra en la tabla 23, después de dos años y medio de simulación, el compartimiento C_{NCL} no resultó sensible ante el cambio de ningún parámetro, ya que la descomposición de la necromasa ocurre rápidamente al inicio de la simulación; el compartimiento C_{NCS} resultó altamente sensible a las variaciones del parámetro k_s , ya que a lo largo del tiempo el carbono presente en este compartimiento no se descompone en su totalidad; el compartimiento C_{BM} resultó poco sensible al parámetro k_{resp} ; el compartimiento C_{HL} resultó altamente sensible a las variaciones de los parámetros k_{BM} y k_{hl} , ya que determinan las entradas y salidas de carbono en dicho compartimiento; observándose una gran acumulación de carbono para el final de la simulación; el compartimiento C_{HS} resultó sensible a las variaciones de los parámetros k_{BM} , k_{hl} y k_{hls} y finalmente para la variable C_{total} resultó bastante sensible a las variaciones de los parámetros k_{BM} y k_{hl} , los cuales determinan el carbono que se acumula en el suelo a lo largo del tiempo.

4.7.- Simulación de la respuesta de la MOS en los diferentes ecosistemas ante escenarios de cambio climático en Venezuela

Se consideró como cambio climático al aumento de 4,5°C en la temperatura del aire y una disminución de 19,4% en la precipitación diaria, para el año 2060 sobre la parte andina de Venezuela, tomando el escenario pesimista según Martelo (2004), para simular la influencia del cambio climático sobre la dinámica de la materia orgánica del suelo en los seis sitios de estudio. Con los cambios propuestos a estas variables, se obtuvo nuevamente la humedad del suelo, utilizando el modelo SAHEL.

El primer paso fue analizar la influencia del cambio climático sobre las funciones de respuesta al clima (ver figura 44). Las líneas de color azul muestran la situación del clima medido durante el experimento de campo, mientras que las líneas de color rojo muestran la situación del clima previsto para el año 2060 con el escenario pesimista. Nótese que las escalas son diferentes para cada sitio.



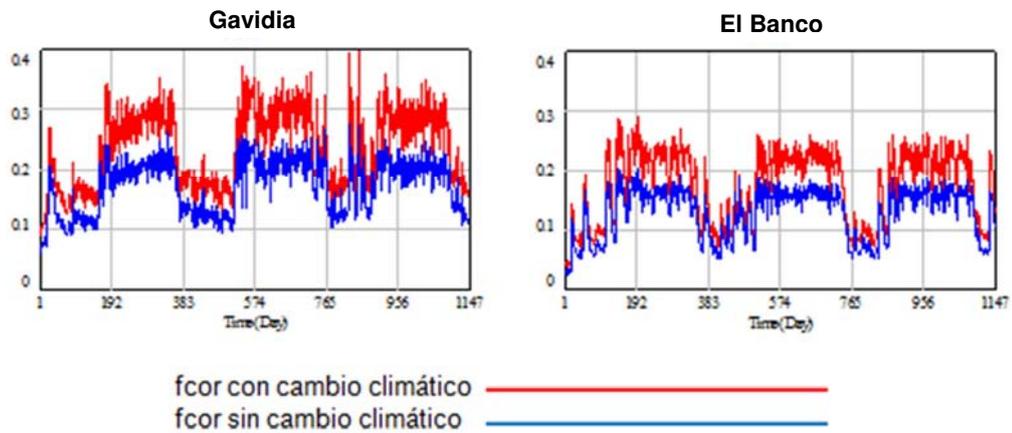


Figura 44: Dinámica diaria de la función de respuesta combinada a la temperatura y a la humedad del suelo $f_t * f_w$ con cambio y sin cambio climático para cada sitio de estudio.

La figura 44, muestra que para el Vigía y Barinas no se observan mayores diferencias en la función de respuesta combinada, mientras que para Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco, esta función de respuesta tiende a aumentar, lo que indicaría que los diferentes procesos de la dinámica del carbono procederían más rápidamente. De igual manera se muestran en la tabla 24 los promedios de los valores diarios de cada función de respuesta al clima para el periodo de estudio.

Sitios	Sin cambio climático			Con cambio climático		
	f_t	f_w	$f_t * f_w$	f_t	f_w	$f_t * f_w$
Vigía	0,9759	0,7843	0,7658	0,9998	0,7544	0,7542
Barinas	0,9701	0,4801	0,4618	1,0000	0,4484	0,4484
Tovar	0,7555	0,8125	0,6136	0,9868	0,7813	0,7709
Santa Rosa	0,4281	0,8202	0,3521	0,6104	0,7864	0,4816
Gavidia	0,2299	0,7515	0,1723	0,3278	0,7209	0,2356
Banco	0,1720	0,7422	0,1280	0,2453	0,7064	0,1737

Tabla 24: Influencia del cambio climático propuesto en el escenario pesimista para el año 2060 sobre las funciones de respuesta a la temperatura f_t , a la humedad del suelo f_w y la función combinada $f_t * f_w$.

En la tabla 24, se observa que la función de respuesta a la temperatura f_t aumenta con el cambio climático para los 6 sitios, pero en El Vigía y Barinas el aumento es insignificante debido a que estos dos sitios ya se encontraban muy cerca de la temperatura óptima para la descomposición. En los demás sitios se observa un aumento más importante de la función de respuesta a la temperatura, especialmente en los tres sitios ubicados a mayor altitud. Lo contrario ocurre con la función de respuesta a la humedad f_w , la cual disminuye en todos los sitios de estudio y esto se debe a la disminución estimada para el 2060 en 19.4 % de la precipitación. El efecto sobre f_w resulta algo más pronunciado para Barinas.

Con respecto a la función de respuesta combinada $f_t * f_w$ se observa que esta disminuye levemente para el Vigía y Barinas donde la disminución de la precipitación resulta más importante que el aumento de la temperatura sobre la función de respuesta combinada, mientras que para el resto de los sitios esta función de respuesta aumenta, predominando el efecto del aumento de la temperatura. Este resultado indicaría que el efecto del cambio climático sobre la descomposición sería más marcado en sitios de altitud que en los ecosistemas de zonas bajas.

Luego, se realizó un primer ejercicio con el modelo MOMOS para dos escenarios posibles, uno sin cambio climático y otro con el cambio climático esperado para el año 2060, considerando la descomposición de la misma cantidad de paja marcada que fue utilizada en el experimento de campo, como se muestra en la figura 45.

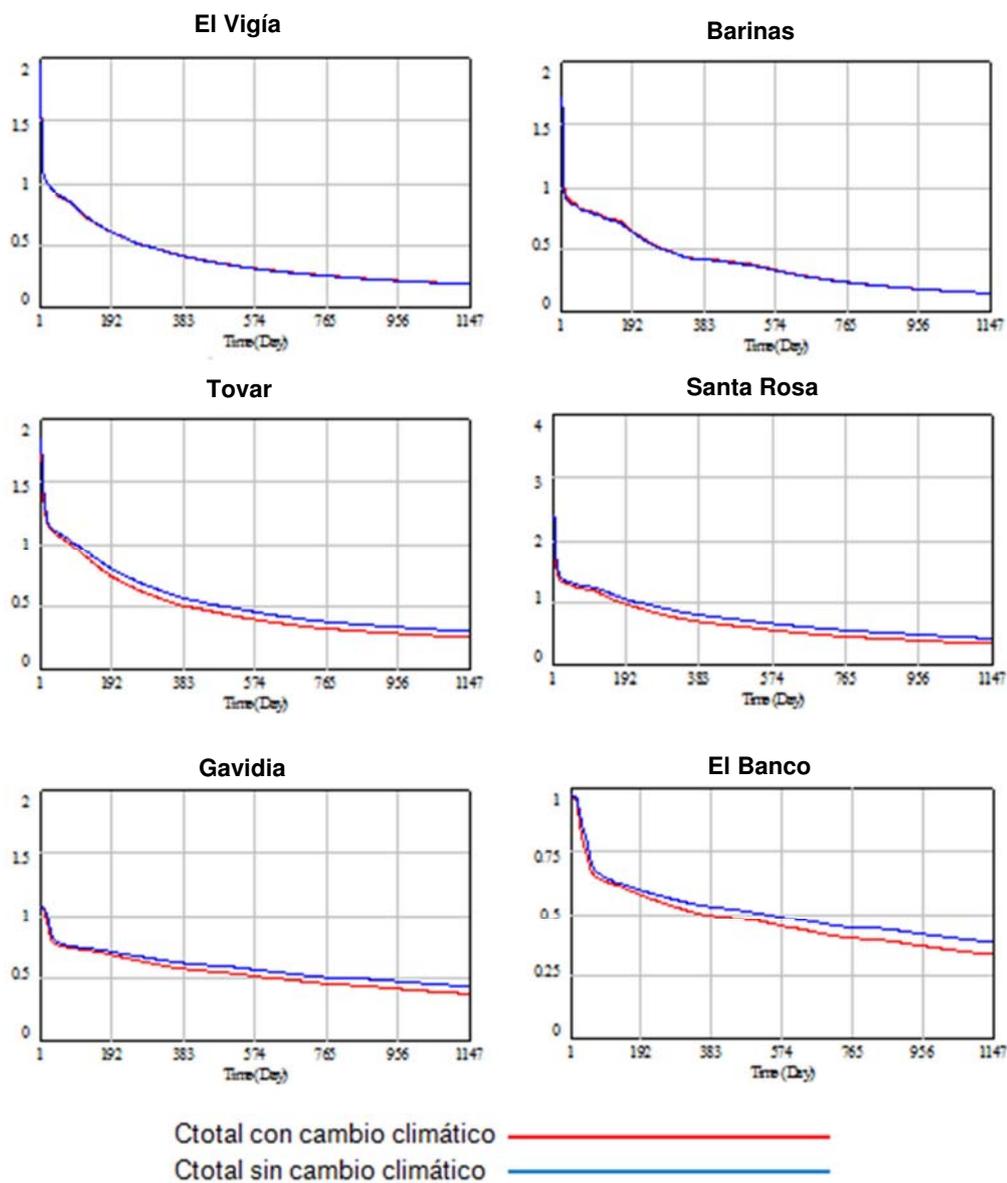


Figura 45: Dinámica del carbono total después de incorporar una cantidad de necromasa al suelo igual a la utilizada en el experimento de campo en condiciones con cambio y sin cambio climático para cada sitio de estudio.

En la figura 45, se aprecia que como era de esperarse, para El Vigía y Barinas el comportamiento es prácticamente el mismo, mientras que para

Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco, se observa una disminución del carbono total en las condiciones de cambio climático.

En un segundo ejercicio, se intentó evaluar el efecto de este cambio climático sobre la cantidad de materia orgánica total del suelo y no únicamente sobre la descomposición de la paja marcada como en el ejercicio anterior. Para esto, se asumió una entrada anual de necromasa al sistema, la cual fue calculada como la cantidad de paja de trigo necesaria para mantener los niveles de carbono total del suelo encontrados en cada sitio, como se muestra en la tabla 25.

Sitios	C_{total} del suelo (g C*kg ⁻¹)	Entrada anual estimada de necromasa (g C*kg ⁻¹)
El Vigía	29	26,8
Barinas	19,22	17,5
Tovar	43,40	34,8
Santa Rosa	115,19	63,3
Gavidia	95,00	38,5
El Banco	46,76	20,8

Tabla 25: Valores de entrada anual de necromasa (paja de trigo) al suelo que serían necesarios para alcanzar una materia orgánica total del suelo equivalente a la encontrada en cada sitio suponiendo una situación de equilibrio.

Con estos valores de entradas anuales de necromasa para cada sitio de estudio y bajo el supuesto de que el cambio climático no afectaría la entrada de necromasa, se corrió el modelo MOMOS sin cambio climático inicializando los compartimientos con los valores en estado de equilibrio y luego se realizó el mismo ejercicio con cambio climático para obtener los valores promedios de los compartimientos luego de 64 años de simulación, como se muestra en la tabla 26.

No fue posible prolongar la simulación bajo el cambio climático hasta alcanzar un nuevo equilibrio debido a que el número de simulaciones que guarda el modelo en Vensim® es limitado.

Sitios	Valores sin cambio climático en estado de equilibrio (g C kg ⁻¹)				Valores con cambio climático después de 64 años (g C kg ⁻¹)			
	C_{BM}	C_{HL}	C_{HS}	C_{total}	C_{BM}	C_{HL}	C_{HS}	C_{total}
El Vigía	0,38	3,77	20	29	0,37	3,73	20,84	29,83
Barinas	0,28	2,26	11,20	19,22	0,28	2,33	11,37	19,36
Tovar	0,72	5,65	29,1	43,40	0,63	5,15	25,83	38,02
Santa Rosa	1,77	14,56	74,20	115,19	1,53	12,90	64,40	97,53
Gavidia	1,26	9,51	53,97	95,00	1,17	9,20	52,09	85,70
El Banco	0,48	3,68	22,15	46,76	0,42	3,10	20,20	39,70

Tabla 26: Tamaño de algunos compartimientos de carbono del suelo sin cambio climático y después de 64 años de cambio climático para los seis sitios considerando que la entrada de necromasa al suelo no se ve afectada por el cambio climático.

La tabla 26, muestra que para el Vigía se observan pérdidas de carbono de los compartimientos C_{BM} y C_{HL} con el cambio climático propuesto, mientras que los compartimientos HS y C_{total} aumentan muy levemente. Para Barinas el compartimiento del C_{BM} no presenta cambios y en el resto de ellos aumenta el carbono pero muy levemente. Los aumentos en estos dos sitios se deben al efecto de la disminución de la precipitación, que disminuye un poco la función combinada de respuesta. Para Tovar, Santa Rosa, Gavidia y el Banco, se observa una disminución de carbono (ver tabla 27), la cual en términos absolutos resultaría mayor para Santa Rosa, donde se estarían liberando a la atmosfera 17,66 gramos de carbono por kilo de suelo, lo cual representa aproximadamente 18 toneladas de carbono por hectárea para los 10 primeros cm de suelo.

Sin embargo el supuesto de que las entradas de necromasa se mantienen iguales y sólo varia su dinámica de descomposición es fuertemente

cuestionable. De producirse también una disminución en la producción vegetal y por ende en la cantidad de necromasa, la disminución del carbono en el suelo podría ser mayor.

Sitios	<i>BM</i> (g C*kg⁻¹)	<i>HL</i> (g C*kg⁻¹)	<i>HS</i> (g C*kg⁻¹)	<i>C_{total}</i> (g C*kg⁻¹)
El Vigía	-0,01 (-2,63)	-0,04(-1,06)	0,84(4,2)	0,83 (2,86)
Barinas	0	0,07(2,92)	0,17(1,52)	0,14 (0,73)
Tovar	-0,09(-12,5)	-0,50(-8,9)	-3,27(-11,24)	-5,38 (-12,4)
Santa Rosa	-0,25(-13,85)	-1,66(-11,4)	-9,8(-13,21)	-17,66 (-15,33)
Gavidia	-0,09(-7,29)	-0,31(-3,27)	-1,88(-3,48)	-9,3 (-9,79)
El Banco	-0,07(-14,25)	-0,59(-15,88)	-1,95(-8,8)	-7,06 (-15,1)

Tabla 27: Cambio neto y porcentual en el tamaño de algunos compartimientos de carbono en el suelo luego de 64 años de simulación.

Capítulo V: Conclusiones

En general, para llevar a cabo el proceso de validación del modelo MOMOS, fue de vital importancia contar con valores diarios de precipitación y temperatura de los seis sitios, que correspondieran al tiempo de incubación del material vegetal marcado en el experimento de campo. Sin embargo, para los sitios de Tovar y Gavidia, sólo se contaban con valores mensuales que sí correspondían a los periodos de estudio, pero que presentaban valores incompletos para algunos meses, además se tenían valores diarios fuera de los periodos de estudio, los cuales fueron tomados de estaciones cercanas a estos sitios. Para solventar esta situación, se desarrolló un simulador de lluvia markoviano en Lenguaje R®, el cual tomó los valores mensuales correspondientes a los periodos de estudio, para luego hacer una conversión de valores mensuales a valores diarios.

Esta fase requirió mayor esfuerzo, ya que se realizó un extenso tratamiento de los datos a fin de verificar la calidad de los mismos, para que trataran de simular lo más parecido el comportamiento del clima para estos dos sitios. Lo que permitió calibrar el modelo SAHEL, para obtener la humedad diaria del suelo y realizar la validación del modelo MOMOS en un gradiente altitudinal. A continuación se mencionan en orden los aspectos más importantes derivados de ésta validación.

El modelo MOMOS, centrado en el funcionamiento de la biomasa microbiana, aplicado por primera vez a dos ecosistemas de alta montaña, puede ser usado como herramienta confiable de predicción de la dinámica de MOS en otros ambientes tropicales tanto de baja altitud como de montaña. El modelo MOMOS muestra que los procesos de descomposición no son principalmente controlados por el nivel de las poblaciones microbianas, sino por su cociente de respiración, las

condiciones climáticas y las propiedades físicas del suelo (textura y pH), como principales impulsores de la dinámica de la MOS.

Así mismo, el acoplamiento del modelo MOMOS con un modelo de agua en el suelo, como SAHEL fue satisfactorio para la validación de este experimento. El modelo SAHEL fue calibrado para cada sitio de estudio utilizando los datos medidos de humedad de las bolsas de suelo y se obtuvo una buena aproximación de esta variable. Para algunos sitios los cálculos y las correcciones de los datos climáticos, probablemente contribuyeron a aumentar la discrepancia entre la humedad medida y la simulada. Sin embargo, a pesar de las posibles limitaciones de las predicciones de SAHEL, la precisión fue suficiente para obtener una buena descripción de la dinámica anual de agua en el suelo y su efecto en la descomposición.

En el modelo MOMOS, la función de respuesta al clima, ajustó satisfactoriamente los valores de los parámetros del modelo a las condiciones climáticas de cada sitio de estudio.

El proceso de calibración del parámetro k_{resp} , fue usado para estimar los valores de la tasa de respiración de la *BM* para cada uno de los seis sitios de estudio, mientras que los otros parámetros han sido usados sin cambios desde la calibración del modelo MOMOS (Pansu et al., 2004).

Luego, se analizó con que propiedades del suelo se correlaciona el parámetro k_{resp} que regula la respiración de los microorganismos. En el artículo de Pansu et al., (2006) se proponía que la textura del suelo era el factor regulador. Los resultados muestran una correlación negativa significativa entre estos parámetros, donde se ve que la respiración disminuye a medida que la textura se hace más fina, esto conforma el rol regulador de la textura. También se encontró una correlación positiva

significativa entre el k_{resp} y el pH. Luego se observó que de hecho estas dos propiedades edáficas (textura y pH) estas correlacionadas en los suelos estudiados. Esto quiere decir que cualquiera de ellas puede ser utilizada para calcular k_{resp} .

Los resultados de la validación del modelo MOMOS fueron aceptables. Sin embargo, la simulación sobre la dinámica de la *BM* no fue como se esperaba, debido a la existencia de un pico al inicio de la descomposición, el cual se produce debido al rápido consumo de la fracción lábil, la cual representa el 86% de la paja añadida. Sin embargo, la ocurrencia y magnitud de este pico no se pudo verificar con los valores medidos en el experimento de campo para los cuatro sitios de menor altitud debido a que el pico simulado se produjo inmediatamente después de incorporar el material marcado al suelo y desapareció antes de efectuar la primera medición de campo que fue aproximadamente un mes después. En este sentido no podemos corroborar cual fue la dinámica real de los microorganismos durante este primer periodo de tiempo.

Para los sitios de mayor altitud, el pico de biomasa microbiana simulado se prolonga más en el tiempo y está aún presente en el momento de la primera medición, pero no se observa en los datos de campo. Esto indica que el mecanismo de crecimiento de la biomasa microbiana después de la adición de un substrato debe ser estudiado más en detalle y que posiblemente el modelo no lo esté simulando correctamente. Se podría estudiar esta variable suprimiendo las primeras mediciones para tener un mejor ajuste de los valores simulados con los de campo, además de una mejor valoración de los estadísticos $\%RMSE$ y NS , sobre todo para Tovar, Gavidia y El Banco. Sin embargo, la posible falta de precisión en esta etapa inicial no pone en peligro a largo plazo la descripción del proceso, como lo demuestra esta simulación.

Por otra parte se predijo correctamente el C_{total} en los seis sitios, con ajuste de un solo parámetro (k_{resp}), el cual se relacionó con las propiedades del suelo (textura y pH), lo cual permite afirmar que el modelo fue validado exitosamente en seis sitios muy contrastantes climáticamente.

Los resultados del análisis de sensibilidad multivariable aplicado al modelo MOMOS, indican que el modelo es sensible ante pequeños cambios en los parámetros del modelo, los cuales se relacionan con las dinámicas del carbono en los compartimientos.

Con la simulación de la respuesta de la MOS a escenarios de cambio climático en Venezuela, el modelo MOMOS predijo el secuestro de carbono en seis ambientes contrastantes. Al aumentar 4,5°C en la temperatura del aire y disminuir 19,4% en la precipitación diaria, se observó una ligera disminución de la biomasa microbiana, una disminución del carbono total del sistema y un aumento en la función de respuesta al clima para algunos de los sitios de estudio.

Además se observó que ante una entrada anual de necromasa constante al sistema, en un escenario con el cambio climático propuesto, los valores de los principales compartimientos (C_{BM} , C_{HL} y C_{HS}) más la variable carbono total, disminuyen en la mayoría de los sitios de estudio. A largo plazo el carbono del suelo, de mantenerse las entradas invariables, se vería mucho más afectado (disminuiría más) en los sistemas de mayor altitud y se vería menos afectado en los sitios bajos, ya que la temperatura ya está muy cerca del óptimo en estos sitios. Sin embargo, el supuesto de que las entradas de necromasa al sistema se mantendrían invariables bajo un escenario de cambio climático es muy cuestionable y para hacer mejores predicciones un modelo como MOMOS debe ser acoplado con un modelo de producción vegetal.

Finalmente, se plantean algunas perspectivas sobre el estudio del modelo MOMOS para futuras investigaciones, entre ellas:

- 1) Comparar el modelo MOMOS con otros modelos disponibles para observar cómo describen el set de datos disponibles y cómo se diferencian en las predicciones a largo plazo.
- 2) Revisar otras funciones de respuesta a la humedad y a la temperatura.
- 3) Estudiar con más detalle la fase inicial del proceso de descomposición para verificar si los picos de biomasa microbiana que predice el modelo MOMOS están realmente ocurriendo.
- 4) Realizar el análisis de sensibilidad al modelo MOMOS tomando en cuenta el efecto de las funciones de respuesta a la temperatura y a la humedad del suelo sobre la dinámica de los compartimientos para varios tiempos de simulación.
- 5) Acoplar el modelo MOMOS a otros modelos, por ejemplo de producción vegetal, para poder simular de forma más completa e integrada, el posible efecto del cambio climático global.

Referencias

Abdala, R. (2000): *Seminario sobre composición isotópica*. [Presentación en línea]. Universidad de Málaga. Málaga, España. [Consultado: 15-08-2006]. Disponible en: <http://externos.uma.es/geml/isotopos.ppt>.

Ablan, M. (2007): *Simulador de lluvia markoviano*. [Documento no publicado]. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.

Andreseen, R., Ponte, R. (1973): *Estudio Climatológico e Hidrológico de las Cuencas de los Ríos Chama y Capazón, Estado Mérida*. [Paper]. IGCRN. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Pág. 135.

Andriulo, A. (2006): *Evolución del contenido de materia orgánica en suelos bajo agricultura continua: análisis y modelización*. [Artículo en línea]. [Consultado: 15-01-2009]. Disponible en: http://www.engormix.com/evolucion_contenido_materia_organica_s_articulos_1089_AGR.htm.

Aracil, J. (1995): *Introducción a la dinámica de sistemas*. [Libro]. Isdefe. Madrid, España. Pág. 56-64.

Bottner, P., Pansu, M., Sarmiento, L., Hervé, D., Callisaya-Bautista, R., Metselaar, K. (2006): *Factors controlling decomposition of soil organic matter in fallow systems of the high tropical Andes: A field simulation approach using ^{14}C and ^{15}N labelled plant material*. [Paper]. Soil Biology & Biochemistry. Vol. 38. Pág. 1-16.

Calentamiento Global. (s.f). [Página web en línea]. [Consultado: 10-02-2007]. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/Calentamiento_global.

Coûteaux, M., Sarmiento, L., Bottner, P., Acevedo, D., Thiéry, T. (2001): *Decomposition of standard plant material along an altitudinal transect (65-3968m) in the tropical Andes*. [Paper]. Soil Biology & Biochemistry. Vol. 34. Pág. 69-78.

García, J. (2007): *Guía del Usuario de Vensim. Capítulo 15: Análisis de sensibilidad*. [Documento en línea]. Pág. 1-23. [Consultado: 07-08-2008]. Disponible en: http://www.ct.upc.edu/catunesco/cursos/vensim_15.pdf.

Haefner, J. (2005): *Modeling biological Systems. Principles and applications*. [Libro]. Springer. Pág. 181-182.

Herrera, M., Del Valle, J., Orrego, S. (2001): *Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de Colombia*. [Documento en línea]. Valdivia, Chile. Pág. 1-18. [Consultado: 16-03-2008] Disponible en: http://www.uach.cl/procarbono/pdf/simposio_carbono/28_Herrera.PDF.

IPCC. (2000): *Informe especial del IPCC: Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura*. [Documento en línea]. Montreal, Canadá. Pág. 9-15. [Consultado: 19-01-2007] Disponible en: <http://www.grida.no/climate/ipcc/spmpdf/srl-s.pdf>.

Jamieson, P., Porter, J., Wilson, D. (1991): *A test of the computer simulation model ARC-WHEATI on wheat crops grown in New Zealand*. [Paper]. Cambridge University Press. Pág. 337-350.

Julca, A., Meneses, L., Blas, R., Bello, S. (2006): *La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura*. [Documento en línea]. [Idesia](http://www.idesia.cl). Vol. 24. Pág. 49-61. [Consultado: 03-03-2008] Disponible en: <http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf>.

Keat, P., Young, P. (2004): *Economía de empresa (4ª ed.)*. [Libro]. Pearson Prentice Hall. Pág. 166-202.

Lavelle, P., Spain, A. (2005): *Soil Ecology*. [Libro]. Kluwer Academic Publishers. Pág. 216-220.

Magdoff, F., Weil, R. (2004): *Soil organic matter in sustainable agriculture*. [Libro]. Advances in Agroecology Series. CRC Press. Pág. 1-24.

Martelo, M. (2003): *Metodología para la selección de modelos de circulación general de la atmósfera y escenarios climáticos a incluir en la Primera Comunicación Nacional en Cambio Climático de Venezuela*. [Paper]. MARN. Revista Geográfica Venezolana. Vol. 48. Pág. 1-12.

Martelo, M. (2004): *Consecuencias ambientales generales del cambio climático en Venezuela*. [Documento en línea]. Resumen Ejecutivo. MARN. Pág. 1-12. [Consultado: 16-09-2008]. Disponible en: <http://www.ciens.ucv.ve:8080/generador/sites/Ecologia%20General%20/archivos/Cambios%20climaticos.pdf>.

Martineau, Y., Saugier, B. (2006): *A process-based model of old-field succession linking ecosystem and community ecology*. [Paper]. Ecological Modelling. Vol. 204. Pág. 399-419.

Martón, J. (2008): *Calentamiento global. Al borde del Límite N°8*. [Libro]. Instituto de Estudios Transnacionales (INET). Córdoba, España. Pág. 9-30.

Matus, F., Maire, C. (2000): *Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de C y N*. [Artículo en línea]. Agricultura técnica. Vol. 60, N° 2. Pág. 112-126. [Consultado: 22-07-

2008]. Disponible en: http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S03658072000000200003&script=sci_arttext.

Metselaar, K. (2003). *Le bilan hydrique de la parcelle (modèle SAHEL)*. Proyecto Tropandes. [Artículo en línea]. Institut de Recherche pour le Développement, Natures Sciences Sociétés – Dialogues. Montpellier, France. [Consultado: 04-10-2008]. Disponible en: <http://netx.u-paris10.fr/nss/atelier6.htm>.

Pansu, M., Bottner, P., Sarmiento, L., Metselaar, K. (2004): *Comparison of five soil organic matter decomposition models using data from a ¹⁴C and ¹⁵N labeling field experiment*. [Paper]. Global Biogeochemical Cycles. Vol. 18. Pág. 1-11.

Pansu, M., Sarmiento, L., Metselaar, K., Hervé, D., Bottner, P. (2006): *Modelling the transformations and sequestration of soil organic matter in two contrasting ecosystems of the Andes*. [Paper]. European Journal of Soil Science. Vol. 58. Pág. 775-785.

Penning de Vries, F., Jansen, D., ten Berge, H., Bakema, A. (1989): *Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops*. [Paper]. Agricultural Systems, Volumen 36. Pág. 244.

Sarmiento, L. (2004): *Modelización de la materia orgánica del suelo en ecosistemas venezolanos y su aplicación a la gestión de la fertilidad y al secuestro de carbono*. [Documento no publicado]. Programa de cooperación ECOS-Nord Venezuela-Francia. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas (ICAE). Mérida, Venezuela. Pág. 1-18.

Shaffer, M., Ma, L., Hansen, S. (2001): *Modeling carbon and nitrogen dynamics for soil management*. [Libro]. CRC Press. Pág. 1-6.

Shibu, M., Leffelaar, P., Van Keulen, H., Aggarwal, P. (2006): *Quantitative description of soil organic matter dynamics: A review of approaches with reference to rice-based cropping systems*. [Paper]. Geoderma. Vol. 137. Pág. 1-18.

Swift, M., Heal, O., Anderson, J. (1979): *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. [Libro]. University California Press. Studies in Ecology. Berkeley, US. Pág. 5-15.

Trezza, R. (2008): *Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela. ¿Cuál método utilizar?*. [Documento en línea]. Bioagro. Vol. 20. Pág. 89-95. [Consultado: 14-11-2008]. Disponible en: <http://www.scielo.org.ve/pdf/ba/v20n2/art02.pdf>.

Wainwright, J., Mulligan, M. (2004): *Environmental modelling. Finding simplicity in complexity*. [Libro]. John Wiley & Sons. Chichester, UK. Pág. 56-58.

Woomer, P., Swift, M. (1994): *The biological management of tropical soil fertility*. [Libro]. John Wiley & Sons. Chichester, UK. Pág. 50-51.