

APROXIMACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA DE MAÍZ (*Zea mays* L.) CON Y SIN ASOCIACIÓN A UNA LEGUMINOSA

José Valdemar Andrade Cadena^{1*}, Luz Marina Rodríguez Cisneros¹, María Rosa Mosquera Losada², Jorge Arroba Rimassa³

¹Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Ibarra, Escuela de Ciencias Agrícolas y Ambientales, Ibarra, Ecuador

²Universidad de Santiago de Compostela, España

³Universidad Central del Ecuador

*Autor para correspondencia: jvandrade1@pucesi.edu.ec

Recibido: 2018/09/30

Aprobado: 2019/05/06

DOI: <https://doi.org/10.26621/XV20.2019.06.A08.PUCESI.2550.6684>

RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo la realización de una aproximación a la creación de un modelo matemático para conocer la dinámica de crecimiento del maíz de variedades locales, cultivado en asociación o no a una leguminosa en las condiciones agroecológicas de la provincia de Imbabura. El desarrollo del modelo partió de la siembra de maíz en diferentes épocas del año (2015 y 2016) en la Granja Experimental de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador localizada en Ibarra, para lo cual se utilizó un diseño de bloques completos al azar en arreglo factorial A x B. Luego del análisis estadístico, se establecieron diferencias entre las épocas de siembra, no así para las variedades y la asociación a la leguminosa, por lo que se establece un modelo preliminar para el cultivo de maíz en zonas agroecológicas similares. Se concluye que, un incremento en la humedad relativa mínima del aire, tiene influencia directa en el rendimiento de biomasa del maíz cultivado en las condiciones de la ciudad de Ibarra.

Palabras claves: Biomasa, modelo matemático, condiciones climáticas.

ABSTRACT

This research is aimed at doing an approximation to a mathematical model creation to know the growth dynamics of local varieties of corn, cultivated in association or not with a legume in the agro-ecological conditions of Imbabura Province. The model development started with the corn planting at different times of the year (2015 and 2016) in the Experimental Farm at the "Pontificia Universidad Católica del Ecuador" located in Ibarra; for this, a randomized complete blocks design was used in A x B factorial arrangement. After the statistical analysis, differences were established among the sowing seasons, but not for the varieties nor the association with the legume; that is why, a preliminary model was established for the corn cultivation in similar agro-ecological zones. The conclusion was that a minimum relative humidity increment of the air influences directly on the biomass yield of the corn grown in the conditions of Ibarra City.

Keywords: Biomass, mathematical model, climate conditions.

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cultivos agrícolas que más se produce en el mundo. Gracias a sus cualidades alimenticias para la nutrición humana, animal y el uso industrial (producción de etanol) que posee, se constituye en uno de los productos más importantes en los mercados internacionales, superando su relevancia económica y social a cualquier otro cultivo. De ahí la importancia a nivel mundial para fomentar el incremento de la productividad de este cultivo, debido a que genera mucho empleo a escala mundial (Pirasteh-Anosheh, y col 2013). Por esta razón, es necesario todo tipo de esfuerzos orientados a que la producción de maíz se incluya en las estrategias vinculadas a la mejora de las políticas, la tecnología y las acciones dirigidas tanto a productores como a consumidores (Santana y col 2018).

La demanda de maíz en el mundo, en los últimos años, se incrementó de forma acelerada. En el año 1995 esta demanda alcanzó los 558 millones de toneladas, casi duplicándose a 1007 millones de toneladas en el año 2014; debido a que este cereal es la base de la alimentación de la población a nivel mundial. Es más, se espera un incremento anual de 3,2% en el consumo mundial y, con ello, la tendencia de un incremento significativo en las exportaciones (FIRA, 2016)

La agricultura es uno de los ejes principales sobre los que se desenvuelve la economía de Ecuador, siendo esta, una actividad fundamental en el ámbito económico y en la seguridad alimentaria, por lo que es decisivo conocer su evolución, su comportamiento y la sostenibilidad en el tiempo (Sumba, 2014). La agricultura en Ecuador refleja la heterogeneidad de un país megadiverso que se subdivide en cuatro zonas geográficas: la zona costera, las tierras altas andinas, la Amazonía y las Islas Galápagos; albergando 14 nacionalidades y 18 grupos étnicos, cada uno con una relación propia con el ecosistema y todos se han enfrentado a la expansión de agronegocios y otras amenazas a su capacidad productiva (Intriago y Col 2017).

En Ecuador, el maíz es básico en la alimentación de los pueblos andinos. Es por esto que, a lo largo del tiempo se han conservado ecotipos con aplicaciones especiales en la dieta básica y en garantía de la soberanía alimentaria (INIAP, 2003). Las variaciones climáticas, sin embargo, han hecho que las pérdidas de producción, así como las prácticas agronómicas de asociación cereal leguminosa se vayan perdiendo, ocasionando además erosión genética y pérdida de los saberes ancestrales asociados al manejo de la biodiversidad (Tapia, 2015).

El concepto de producción agrícola se utiliza para

hacer referencia al tipo de productos y beneficios que la actividad agrícola genera. Este concepto se define como la cantidad total producida de los bienes destinados para el mercado interno y externo. Para este fin, y con el objeto de predecir la producción del cultivo de maíz en la actualidad, se emplean modelos de simulación que permiten reflexionar anticipadamente sobre la cantidad de producto a cosechar (Sumba, 2014). Un modelo es la representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones. Pueden ser descriptivos o de simulación. En los primeros únicamente se representan los componentes del sistema, mientras que en los segundos se imita el funcionamiento del sistema y se obtienen resultados predictivos, en forma de datos numéricos o gráficos (Candelaria y col 2011).

La simulación es el proceso de ejecución de un modelo por el cual se obtienen unos resultados sobre el estado de cada componente. Los principales componentes de los modelos son: el clima o meteorología (Bracco y col 2016), el suelo, la vegetación, los animales y el gestor o tomador de decisiones (Marín-González y col 2018). Existen diversos modelos de simulación de cultivos que se emplean ampliamente para incorporar el impacto del cambio climático sobre varios servicios ecosistémicos junto con los aspectos biofísicos de cosechas, aunque muchos de ellos han intentado simular los rendimientos, utilizando proyecciones climáticas derivadas del clima general, acoplado atmósfera-océano (Bhattarai y col 2017). Las predicciones del rendimiento a largo plazo son necesarias para evaluar la rentabilidad económica (Van der Werf y col 2007).

Los modelos matemáticos, son representaciones teóricas de un sistema o de la realidad que se expresan por medio de las matemáticas (Hernández y col 2011). Puesto que las hipótesis generadas de las interacciones de los sistemas agrícolas, ecológicos y ambientales (Caselles, 2008) son muy complejos, a los modelos se los considera una herramienta capaz de traducir la complejidad en parámetros numéricos sencillos (Hernández y col 2009). Un modelo es la representación simplificada de un sistema, donde se describen las variables dependientes e independientes de interés, características y restricciones mediante símbolos, diagramas y ecuaciones (Cervantes, 2015). Pueden ser descriptivos o de simulación; en los primeros únicamente se representan los componentes del sistema, mientras que en los segundos se imita el funcionamiento del sistema y se obtienen resultados predictivos, en forma de datos numéricos o gráficos (Candelaria y Col 2011).

De acuerdo con Steduto (2003), los modelos que simulan la producción de biomasa de los cultivos, están basados en lo que se conoce como motor de crecimiento, ya que integran los balances de energía y materia de los sistemas agrícolas. Por su parte, Overman y Allen R. (2002) resaltan que los modelos dinámicos para el desarrollo de biomasa en el maíz, se establecen cuando se conoce la interacción entre los medios bióticos y abióticos. Así mismo, la escasez de recursos naturales, necesarios para el desarrollo de los procesos agrícolas, hace necesario que se consideren la utilización de herramientas informáticas, que permitan predecir eventos en escenarios cambiantes (Pfister y col 2005), agrupando estos modelos en tres tipos: 1) modelos de simulación de cultivos; 2) modelos de optimización; 3) modelos para la toma de decisiones por los agricultores y por funcionarios que gestionan las políticas públicas.

De la misma forma, en los últimos años el desarrollo de los sistemas agroforestales y la asociación de más de una especie en el mismo campo, ha llevado al desarrollo de modelos que permitan a los funcionarios tomar decisiones en las políticas públicas, encaminadas a mitigar los efectos del cambio climático, reducir la degradación del suelo y garantizar la seguridad alimentaria. El desarrollo de modelos predictivos para cultivos intercalados resulta ser más complejo, debido a las distintas interacciones que existen (Luedeling y Col 2016). Por su parte, en el desarrollo de modelos predictivos se deben considerar los efectos de las condiciones ambientales en el rendimiento que puedan alcanzar los cultivos, frente a variaciones del tiempo atmosférico (Wang y Col 2016), lo que ha obligado a los agricultores a desplazar las épocas de siembra, no siempre coincidiendo con las mejores épocas para el desarrollo de los cultivos. Con estas consideraciones se han probado modelos en los que se limiten las condiciones, sin restricción de riego y en déficit controlado, como escenario de alteraciones ambientales (Ahmadi y Col 2015), siendo esta una alternativa que tienen los países con acceso limitado a los recursos hídricos (Flores y Col 2013).

En un estudio realizado en Estados Unidos, en las áreas de Wisconsin, New York y Massachusetts, se evaluó la población de plantas de maíz, con la radiación solar interceptada en el rendimiento de biomasa del maíz, creando un modelo lineal predictivo para cada zona de cultivo (Overman y Scholtz III, 2011). Las ecuaciones generadas para la zona de Wisconsin, se fundamentan en el modelo exponencial simple; así mismo, los coeficientes de correlación no lineales son de 0,9915. De la misma manera Overman y Scholtz III, (2004), conducen un experimento en Tallahassee, estado de la Florida, en la que se mide la acumulación de biomasa en la planta y el contenido de nutrientes; se establece que el modelo

de crecimiento expandido, describe de una buena forma la acumulación de materia seca en la biomasa entre las 14 y 20 semanas, sin embargo luego se presenta una disminución de la misma.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo del modelo predictivo de rendimiento de Biomasa de maíz, cultivado en las condiciones agroecológicas del Ecuador, en la granja experimental de la Pontificia Universidad del Ecuador sede Ibarra, ubicada en las coordenadas geográficas 1738766 Norte y 822100 Oeste; a una altitud de 2221 m.s.n.m.; se utilizó un Diseño de Bloques Completos al Azar en arreglo Factorial A x B con tres repeticiones, y cuatro tratamientos: dos variedades (Chaucho (*Zea mays* INIAP 122) y Huandango (*Zea mays*)) con y sin leguminosas (*Phaseolus vulgaris* Var. Canario voluble) tal y como se señala en la Tabla 1; que se sembraron y cosecharon en diferentes fechas (tabla 3). Las variables evaluadas para el establecimiento del modelo fueron fenología (escala BBCH), densidad real (plantas totales por hectárea), peso de la planta ver, biomasa verde, contenido en la biomasa de proteína, energía, calcio, fósforo, magnesio, potasio sodio y ceniza; las del clima: temperatura máxima, mínima, media, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, nivel de CO₂; las edáficas: textura (arena, arcilla, limo), materia orgánica, pH, Ce, nitrógeno total, fósforo, potasio, calcio, magnesio, sodio. Para la evaluación de las variables del crecimiento vegetativo, se procedió con las medidas alcanzadas por las plantas a los 15,30,45,60,75, 90 días después, de la emergencia a una muestra de 18 plantas (final de la floración). El contenido de nutrientes en la biomasa se lo realizó cada 30 días de una planta, de cada una de las parcelas tomada al azar, hasta los 120 días posteriores a la emergencia del cultivo; las variables climáticas resultaron del promedio diario de las mediciones realizadas por los equipos de climatología Vantage Pro2™; las analíticas del suelo se realizaron antes de la plantación de los diferentes experimentos y luego de 90 días de la incorporación de los residuos de la cosecha. Como análisis estadístico se utilizó el análisis de varianza y la diferencia de medias de LDS al 5%. Para la generación del modelo se partió de la aplicación de un modelo lineal predictivo, mediante el método de correlación múltiple y análisis de varianza de las variables que presentan mayor grado de correlación entre ellas.

Tabla 1. Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Simbología	Descripción
T1	CHSL	Chacho, sin legumbre
T2	CHCL	Chacho con legumbre
T3	HUSL	Huandango, sin legumbre
T4	HUCL	Huandango, con legumbre

Las características de las 12 Unidades experimentales se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Esquema del ensayo y las Unidades Experimentales

Largo de la unidad experimental	6,00 m
Ancho de la parcela	4,00 m
Área de la Unidad experimental	24,00 m ²
Área del bloque	96,00 m ²
Área total por ensayo por época	320,00 m ²
Área total del ensayo 4 épocas	1360,00m ²
Distancia entre surcos	0,80 m
Distancia entre plantas	0,25 m
Plantas parcela	120
Plantas en parcela neta	72

Tabla 3. Fechas de siembra y Cosecha

Fecha de siembra	Lote	Fecha de cosecha
06/01/2015	1	1/07/2015
08/04/2015	2	30/09/2015
01/07/2015	3	16/12/2015
07/10/2015	4	30/03/2016
07/01/2016	5	30/06/2016
06/04/2016	6	28/09/2016
06/07/2016	7	28/12/2016
21/10/2016	8	12/04/2017

Tabla 4. Esquema del ANOVA

	FV	GL
Siembra		7
Muestreo		4
Tratamientos		3
Repeticiones		2
Siembra*muestreo		28
Siembra*tratamientos		21
Siembras*repeticiones		14
Muestreo*tratamiento		12
Muestreo*repetición		8
Tratamiento*repetición		6
Siembra*muestreo*tratamiento		84
Siembra*muestreo*repetición		56
Siembra*tratamiento*repetición		42
Muestreo*tratamiento*repetición		24

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones climáticas de la zona de estudio se resumen en la Tabla 5; en la que se toman los datos procesados entre los años 2009 y 2017, de cada una de las variables intervinientes en el desarrollo del modelo de predicción. De la misma forma, se presenta el diagrama ombrotérmico (Figura 1) del sitio del experimento.

Tabla 5. Valores promedios mensuales de variables climáticas de los años 2009-2017*

Meses	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Humedad relativa media (%)	Radiación max (W m ⁻²)	Velocidad del viento media (m s ⁻¹)	Nivel CO ₂ (ppm)
Ene	54,16	16,18	89,04	1031,14	0,66	458,76
Feb	40,20	16,33	89,15	1043,65	0,66	454,53
Mar	63,50	16,56	90,34	1026,31	0,62	453,03
Abr	90,30	16,58	90,32	1051,71	0,57	446,87
May	70,66	17,04	88,55	1023,58	0,52	440,18
Jun	27,30	16,50	87,68	1008,21	0,61	439,48
Jul	18,21	16,10	86,28	1041,44	0,75	434,90
Agt	8,10	16,09	84,45	1057,04	0,81	434,10
Sept	24,11	16,26	84,88	1077,11	0,84	433,93
Oct	53,21	16,35	88,81	992,12	0,64	448,92
Nov	55,17	16,35	89,61	959,61	0,61	459,89
Dic	40,26	16,52	88,32	936,01	0,58	450,50

Fuente: (Recalde, 2016) *datos procesados sin publicar

El análisis de varianza múltiple de las variables del suelo (Tabla 6), muestra diferencias altamente significativas para el modelo lineal; no así para la variable de pH. En cuanto a los tratamientos, el análisis factorial múltiple presenta diferencia altamente significativa para la humedad, conductividad eléctrica, contenido de arena, acilla y limo, contenido de fósforo, potasio, calcio magnesio y sodio; no se encontró diferencia significativa para el pH, contenido de carbono, materia orgánica y nitrógeno.

Por su parte, el análisis factorial múltiple de la fecha de muestreo de las variables de suelo, antes de la siembra y 90 días posteriores a la incorporación de los residuos vegetales, luego de la cosecha en cada uno de los experimentos, presenta diferencias altamente significativas para todas las variables, con excepción del valor de pH que se presenta como no significativo.

Tabla 6. Análisis de varianza múltiple para las variables físico-químicas del suelo de los factores tratamiento y fecha de siembra.

Variable	Modelo	Tratamiento	Fecha	Fecha*tratamiento
Humedad	***	***	***	***
pH	ns	ns	ns	ns
Ce	***	***	***	***
Arena	***	**	***	***
Arcilla	***	***	***	***
Limo	***	***	***	***
C	***	ns	***	ns
Mo	***	ns	***	**
N	***	ns	***	**
P	***	***	***	***
K	***	**	***	ns
Ca	***	***	***	***
Mg	***	***	***	***
Na	***	***	***	***

ns= no significativo; **= significativo p <0,001; ***= significativo p<0,0001

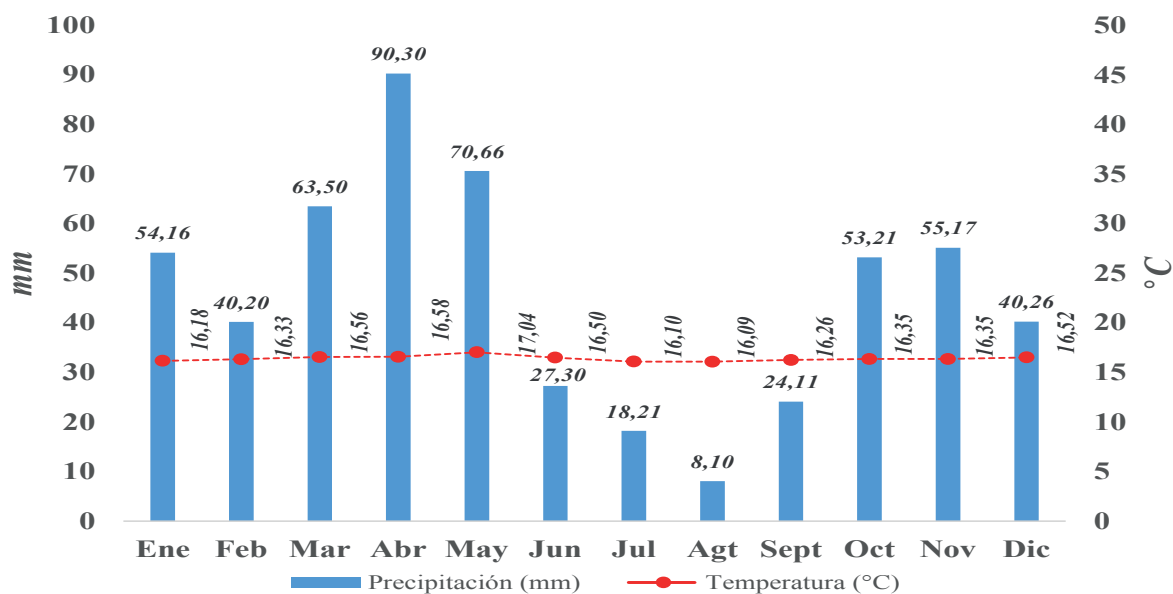


Figura 1. Diagrama ombrotérmico de la ciudad de Ibarra del periodo comprendido entre 2009-2017

La interacción múltiple de los factores tratamiento y fechas de muestreo presenta valores altamente significativos para las variables medidas, y como no significativa para el valor de pH contenido de carbono y potasio del suelo. En lo referente a las fechas de siembra de los tratamientos y el análisis del contenido de nutrientes en el suelo antes de la siembra y luego de 90 días posteriores a la incorporación de los residuos de la cosecha, mostró diferencias altamente significativas en las distintas variables de estudio y no se presenta diferencia para los valores de pH (Tabla 7). La incorporación de los residuos de la cosecha en los diferentes nutrientes muestreados, presentan incrementos significativos de sus valores en el suelo, lo que influye en un incremento en el desarrollo de la biomasa del maíz.

La comparación múltiple de medias (LDS) de las fechas de siembra, presenta diferencias significativas entre las variables de producción de biomasa (Tabla 9).

La interacción entre la fecha de siembra y los tratamientos (variedades de maíz sin y con asociación a leguminosa) presentan diferencias significativas en las comparaciones múltiples de medias (LDS). La fecha 5 de siembra (siembra de enero de 2016) fue la única en no presentar diferencias en cada una de las variables del desarrollo de biomasa (Tabla 10) en el resto de fecha de siembra se presentan diferencias en al menos una de las variables.

La producción de biomasa de los tratamientos en estudio, presenta diferencias altamente significativas para las variables, peso de la planta verde, peso de la biomasa verde y proteína en la biomasa (Tabla 8). En cuanto a la fecha de siembra de los tratamientos, se presenta una diferencia altamente significativa para todas las variables de estudio. Sin embargo, la interacción de los tratamientos con la fecha de siembra, se determinó la existencia de diferencias altamente significativas entre el peso de la planta verde y de su proteína; no se determinó la existencia de diferencias significativas para el resto de variables intervinientes.

Tabla 7. Análisis de varianza de las fechas de siembra, de las características físico-químicas del suelo antes de la siembra y a los 90 días posteriores a la incorporación de residuos de la cosecha

	Fechas															
	1 17/12/2014	2 5/10/2015	3 30/3/2015	4 5/1/2016	5 22/6/2015	6 16/3/2016	7 30/9/2016	8 28/9/2015	9 14/12/2015	10 28/9/2016	11 28/3/2016	12 31/1/2017	13 28/6/2016	14 27/3/2017	15 28/9/2016	16 17/7/2017
Humedad	22,82	20,95	22,94	25,41	22,98	24,12	24,16	22,86	22,96	25,44	20,79	22,69	23,37	21,76	22,38	22,37
Grupo	cd	f	cd	a	cd	b	b	cd	cd	a	f	d	c	e	de	de
pH	7,04	6,97	7,01	6,97	6,99	7,01	7,03	6,95	7,00	7,03	6,99	7,03	7,03	7,07	7,05	7,05
Grupo	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a	a
Ce	46,83	59,63	61,85	62,59	67,27	64,22	57,66	58,68	65,31	60,55	64,64	65,29	65,80	64,27	63,66	63,12
Grupo	l	ij	gh	fg	a	cde	k	jk	bc	hi	bcd	bc	b	cde	def	efg
Arena	34,26	32,06	32,06	31,74	31,99	32,91	32,56	32,25	33,38	31,75	32,54	31,75	33,16	32,18	32,30	32,23
Grupo	a	ef	def	f	ef	bcd	cde	def	b	f	cde	f	bc	ef	def	def
Arcilla	38,48	36,83	36,42	35,88	35,91	35,52	35,10	36,22	37,12	37,29	35,69	36,08	36,64	36,56	36,87	35,93
Grupo	a	bcd	cdef	efg	efg	hi	i	defg	bc	b	ghi	efgh	bode	bode	bcd	efg
Limo	27,24	31,10	31,50	32,36	32,09	31,55	32,32	31,51	29,48	30,95	31,75	32,15	30,18	31,25	30,82	31,83
Grupo	g	cde	abcd	a	ab	abcd	a	abcd	f	cde	abc	ab	ef	bcd	de	abc
C	0,78	0,78	0,77	0,79	0,78	0,79	0,80	0,79	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Grupo	j	i	k	h	i	g	ab	f	cde	ed	a	cd	bc	e	bc	ed
Mo	0,85	1,22	1,11	1,42	1,03	1,12	1,07	1,16	1,35	1,36	1,22	1,27	1,34	1,32	1,37	1,41
Grupo	j	ef	hg	a	i	gh	hi	fg	bc	abc	ef	de	bc	cd	abc	abc
N	0,12	0,13	0,13	0,14	0,14	0,14	0,15	0,17	0,14	0,15	0,14	0,14	0,15	0,15	0,14	0,14
Grupo	j	h	i	f	g	cde	bc	a	de	bc	cde	cde	cd	b	ef	cde
P	22,78	20,26	21,44	21,32	19,15	19,35	17,72	19,13	19,79	20,02	19,49	21,11	20,77	20,50	20,00	20,51
Grupo	a	efg	b	bc	j	j	k	jk	ghij	efg	ij	bcd	cde	def	efgh	def
K	0,48	0,51	0,51	0,54	0,50	0,51	0,51	0,53	0,53	0,54	0,52	0,53	0,51	0,52	0,52	0,53
Grupo	f	de	def	ab	e	e	e	abc	abc	a	bcd	abc	de	cde	abcd	abc
Ca	5,29	5,20	5,20	5,56	4,76	4,86	4,92	5,12	5,22	5,31	5,69	5,30	5,12	5,15	5,23	5,38
Grupo	cde	cde	cde	ab	f	f	f	e	cde	cd	a	cde	e	def	cde	bc
Mg	0,75	0,84	0,86	0,88	0,76	0,79	0,86	0,83	0,87	0,91	0,89	0,94	0,88	0,88	0,89	0,89
Grupo	i	fg	ef	bode	i	h	ef	g	cdef	b	bcd	a	cde	bode	bode	bode
Na	0,35	0,36	0,36	0,36	0,39	0,38	0,38	0,36	0,36	0,36	0,37	0,39	0,38	0,40	0,39	0,39
Grupo	e	de	de	de	ab	bc	c	e	de	e	cd	abc	bc	a	ab	ab

* antes de la siembra (as)
 ** 90 días después de la cosecha (90 ddc)

Tabla 8. Análisis de varianza múltiple de la producción de biomasa

Variable	Modelo	Tratamiento	Fecha	Fecha*tratamiento
Fenología	***	ns	***	ns
Densidad real	***	ns	***	ns
Peso planta verde	***	***	***	***
Biomasa verde	***	***	***	ns
Proteína biomasa	***	***	***	***
Energía biomasa	***	ns	***	ns
P	***	ns	***	ns
K	***	ns	***	ns
Ca	***	ns	***	ns
Mg	***	ns	***	ns
Na	***	ns	***	ns
Ceniza	***	ns	***	ns

ns= no significativo; **= significativo $p < 0,001$; ***= significativo $p < 0,0001$

Tabla 9. Comparaciones múltiples de medias de las fechas de siembra de las variables

		Fechas de siembra							
		1 6/1/2015	2 8/4/2015	3 1/7/2015	4 7/10/2015	5 7/1/2016	6 6/4/2016	7 6/7/2016	8 21/10/2016
Fenología	Promedio	56,61	55,56	50,56	50,6	50,76	49,85	50,05	50,6
	Grupo	a	b	c	c	c	e	de	dc
Densidad real	Promedio	41979,17	41574,07	40243,06	47858,8	47118,06	43796,3	44826,39	48229,17
	Grupo	f	g	h	b	c	e	d	a
Peso planta verde	Promedio	601,492	567,42	560,41	618,34	637,39	615,92	642,68	723,12
	Grupo	d	e	e	c	b	c	b	a
Biomasa verde	Promedio	24390,4	22547	20792,1	29272	30042,1	26120,1	27536,8	34350
	Grupo	f	g	h	c	b	e	d	a
Proteína biomasa	Promedio	7,46	6,67	7,03	7,01	7,01	6,86	6,65	6,67
	Grupo	a	c	b	b	b	c	d	d
Energía biomasa	Promedio	3746,59	3781,97	3628,91	3507,54	3475,47	3432,06	3402,77	3375,06
	Grupo	b	a	c	d	e	f	g	h
P	Promedio	90,06	98,07	92,31	52	51,68	49,31	51,06	54,3
	Grupo	c	a	b	e	e	f	e	d
K	Promedio	285,18	290,42	271,31	105,29	106,57	103,38	109,48	113,5
	Grupo	b	a	c	g	f	h	e	d
Ca	Promedio	27,28	29,12	29,97	29,26	28,82	27,95	27,82	29,93
	Grupo	c	ab	a	ab	b	c	c	a
Mg	Promedio	69,82	73,26	76,4	20,4	19,75	18,84	19,59	19,34
	Grupo	c	b	a	d	de	f	ef	ef
Na	Promedio	181,01	185,73	182,2	180,35	178,94	172,33	178,83	181,44
	Grupo	bc	a	b	bc	c	d	c	bc
Ceniza	Promedio	0,554	0,539	0,52	0,526	0,526	0,506	0,521	0,524
	Grupo	a	b	d	c	c	e	d	c

Tabla 10. Comparación múltiple de medias de la interacción fecha de siembra y tratamientos

Variable	Tratamiento	Fechas de siembra															
		Fecha 1 6/1/2015		Fecha 2 8/4/2015		Fecha 3 1/7/2015		Fecha 4 7/10/2015		Fecha 5 7/1/2016		Fecha 6 6/4/2016		Fecha 7 6/7/2016		Fecha 8 21/10/2016	
		Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo	Promedio	Grupo
Fenología	Chsl	56,4	b	55,73	a	50,33	a	50,6	ab	50,26	a	50	a	50,06	a	50,46	a
	Chcl	56,53	ab	55,6	a	50,86	a	50,53	ab	50,86	a	49,86	a	50,2	a	50,45	a
	Husl	56,86	a	55,33	a	50,66	a	51,13	a	51,13	a	49,8	a	50,06	a	50,4	a
Densidad	Hucl	56,66	ab	55,6	a	50,4	a	50,13	b	50,8	a	49,73	a	49,86	a	50,13	a
	Chsl	42129,6	a	41666,7	a	40138,9	a	47685,2	b	47037	a	43888,9	a	44583,3	b	48055,6	bc
	Chcl	41481,5	b	41388,9	a	40324,1	a	47870,4	ab	46944,4	a	43888,9	a	44861,1	ab	48009,3	c
Peso planta verde	Husl	42037	a	41666,7	a	40092,6	a	47870,4	ab	47175,9	a	43935,2	a	44861,1	ab	48472,2	a
	Hucl	42268,5	a	41574,1	a	40416,7	a	48009,3	a	47314,8	a	43472,2	b	45000	a	48379,6	ab
	Chsl	610,77	ab	572,87	ab	565,65	a	631,05	a	641,94	a	619,98	a	650,1	a	715,41	a
Biomasa verde	Chcl	595,1	b	553,63	c	548,93	b	615,81	b	632,69	a	610,23	b	646,26	a	721,1	a
	Husl	629,225	a	577,47	a	565,59	a	618,82	ab	642,45	a	620,18	a	634,48	a	729,07	a
	Hucl	570,868	c	565,73	b	561,47	a	607,67	b	632,49	a	613,48	ab	639,87	a	726,92	a
Proteína biomasa	Chsl	24903,7	a	22783,1	a	20902,9	a	29708,2	a	30116,6	a	26321	a	27655	a	33908,8	a
	Chcl	23730,9	b	21918,4	b	20422,5	b	29163,4	ab	29796,8	a	25987,1	b	27774,7	a	33988,1	a
	Husl	25561	a	22945,8	a	20887,6	a	29326,4	ab	30318,7	a	26357,9	a	27284,3	a	34843,6	a
Energía biomasa	Hucl	23366,2	b	22540,7	a	20955,4	a	28889,9	b	29936,2	a	25815,5	b	27433,3	a	34659,4	a
	Chsl	7,59	a	7,51	a	7,11	a	7,07	a	7,03	a	6,86	a	6,66	a	6,68	ab
	Chcl	7,48	a	6,38	c	6,95	b	6,95	b	6,99	a	6,86	a	6,62	a	6,61	bc
P	Husl	7,51	a	7,17	b	7,08	a	7,08	a	7	a	6,87	a	6,69	a	6,73	a
	Hucl	7,25	a	6,35	c	6,97	b	6,92	b	7,01	a	6,85	a	6,65	a	6,67	ab
	Chsl	3794,41	a	3820,12	a	3636,67	a	3512,17	ab	3479,46	a	3435,16	a	3402,27	a	3369,626	a
K	Chcl	3674,96	b	3760,28	b	3612,08	b	3496,88	c	3471,5	a	3430,11	a	3403,92	a	3373,065	a
	Husl	3751,81	ab	3778,87	b	3638,46	a	3518,95	a	3475,81	a	3433,27	a	3400,7	a	3379,711	a
	Hucl	3765,16	ab	3768,61	b	3628,4	ab	3502,14	bc	3475,08	a	3429,68	a	3404,17	a	3377,823	a
Ca	Chsl	90,61	a	96,82	c	93,58	a	52,43	a	51,68	a	51,18	a	51,59	a	53,55	a
	Chcl	90,43	a	97,95	b	91,26	b	51,78	ab	51,85	a	48,81	a	50,72	a	54,59	a
	Husl	89,95	a	98,08	b	93,08	ab	52,44	a	51,66	a	48,67	a	50,48	a	54,9	a
Mg	Hucl	89,26	a	99,42	a	91,31	ab	51,36	b	51,53	a	48,59	a	51,47	a	54,17	a
	Chsl	284,74	a	289,66	a	271,1	a	106,14	ab	106,14	a	103,44	ab	109,45	a	113,27	a
	Chcl	284,89	a	290,38	a	271,37	a	103,85	c	106,57	a	102,58	b	109,04	a	113,14	a
Na	Husl	285,92	a	291,16	a	271,49	a	106,77	a	107,54	a	104,22	a	110,14	a	113,85	a
	Hucl	285,17	a	290,5	a	271,26	a	104,39	bc	106,05	a	103,27	ab	109,04	a	113,73	a
	Chsl	27,73	ab	29,27	a	29,78	a	29,43	a	28,68	a	28,17	a	27,54	a	29,97	a
Ceniza	Chcl	28,4	a	28,79	a	30,13	a	28,93	a	28,92	a	27,52	a	27,98	a	29	a
	Husl	26,6	b	28,91	a	29,97	a	29,4	a	28,82	a	28,21	a	28,48	a	30,24	a
	Hucl	26,4	b	29,53	a	29,99	a	29,26	a	28,85	a	27,88	a	27,27	a	30,5	a
Mg	Chsl	70,5	a	72,78	a	76,39	a	20,48	ab	19,73	a	18,66	a	19,49	a	18,39	a
	Chcl	69,6	a	72,86	a	76,34	a	20,13	b	19,87	a	18,65	a	19,58	a	19,47	a
	Husl	69,46	a	73,72	a	76,55	a	20,86	a	19,8	a	18,98	a	19,65	a	18,96	a
Na	Hucl	69,7	a	73,7	a	76,31	a	20,15	b	19,57	a	19,05	a	19,66	a	20,52	a
	Chsl	181,26	a	185,46	ab	184,91	a	183,38	a	176,33	a	173,41	a	177	a	175,99	a
	Chcl	180,26	a	186,86	a	181,95	a	180,89	a	180,62	a	171,86	a	178,78	a	184,86	a
Ceniza	Husl	181	a	184,4	b	179,85	a	181,58	a	177,7	a	172,65	a	180,37	a	180,28	a
	Hucl	181,53	a	186,2	a	182,08	a	175,54	b	181,13	a	171,38	a	179,16	a	184,64	a
	Chsl	0,556	ab	0,536	b	0,518	b	0,526	a	0,526	a	0,506	a	0,524	a	0,522	a
Ceniza	Chcl	0,547	b	0,537	b	0,522	a	0,527	a	0,526	a	0,506	a	0,52	a	0,524	a
	Husl	0,562	a	0,54	ab	0,52	ab	0,527	a	0,526	a	0,506	a	0,52	a	0,526	a
	Hucl	0,552	ab	0,542	a	0,522	a	0,526	a	0,526	a	0,505	a	0,52	a	0,524	a

Aproximación a la expresión de predicción de rendimiento de biomasa

Luego del análisis de correlación múltiple, se establece que las variables medidas en los experimentos, determinan el número de días transcurridos desde la siembra, hasta la máxima altura de planta, el nivel de nitrógeno total en

suelo y la humedad relativa mínimo, así como influyen en el rendimiento final de biomasa, tal como se expresa en la siguiente ecuación.

$$\text{Biomasa} = -77782,3 + 499,1 \text{ NDIASsiembra} + 216837,5 \text{ Ntotal} + 561,6 \text{ hrmin}$$

Donde:

NDIASsiembra= días transcurridos de la siembra al máximo rendimiento de Biomasa

Ntotal= contenido de nitrógeno total en suelo

Hrmin= humedad relativa mínima

Tabla 11. Resumen del ajuste

R cuadrado	0,845
R cuadrado ajustado	0,842
Raíz del error cuadrático medio	8657,461

El análisis del resumen de ajuste entre las variables intervinientes en el modelo, para la producción de biomasa, genera un coeficiente de correlación ajustado de 0,842; con un grado de relación entre las variables alto Tabla 12.

Tabla 12. Análisis de varianza para la correlación múltiple del modelo de rendimiento de biomasa

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media de los cuadrados	Razón F
Modelo	3	6,3925e+10	2,131e+10	284,2940
Error	156	1,1692e+10	74951628	Prob > F
C. Total	159	7,5617e+10		<.0001*

Cuando se analiza la varianza del modelo de rendimiento de biomasa (Tabla 13), se establece un valor significativo en favor de las variables intervinientes del modelo. Por lo tanto, se confirma que las predicciones que se realicen para la zona de estudio, tienen una alta probabilidad de acercarse a los valores esperados.

Las estimaciones de los parámetros para determinar la ecuación de rendimiento, establece los diferentes coeficientes y el análisis de probabilidades con valores significativos para las variables intervinientes del modelo de predicción, de los rendimientos de biomasa en el cultivo de maíz. En la Figura 2 obtenida, se pueden establecer perfiladores de predicción, para cada una de las variables intervinientes en la ecuación lineal del modelo. El perfilador nos permite desplazar tanto el eje de las ordenadas, para simular el rendimiento, en cuanto a la producción de biomasa (eje de las abscisas) que se puede alcanzar al incrementar o disminuir los días a la cosecha de biomasa, el contenido en el nivel de nitrógeno del suelo o la reducción o incremento de la humedad relativa mínima del aire. Se debe considerar que la variación en el rendimiento, de este modelo de predicción, se alcanza dentro de los límites mínimos y máximos de cada una de las variables intervinientes y que han sido determinados mediante pruebas analíticas.

La Figura 3, muestra la variabilidad de los datos generados durante los experimentos, respecto a la predicción. La

banda gris representa los intervalos de confianza de la predicción.

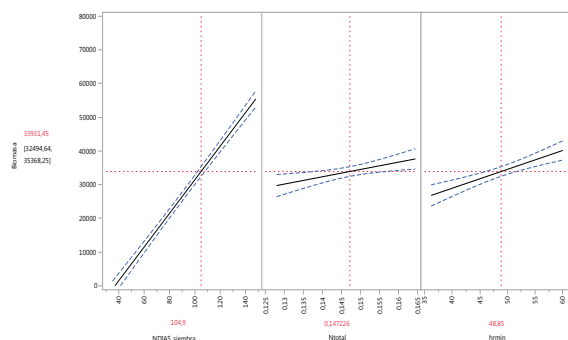


Figura 2. Perfilador de predicción del rendimiento de biomasa

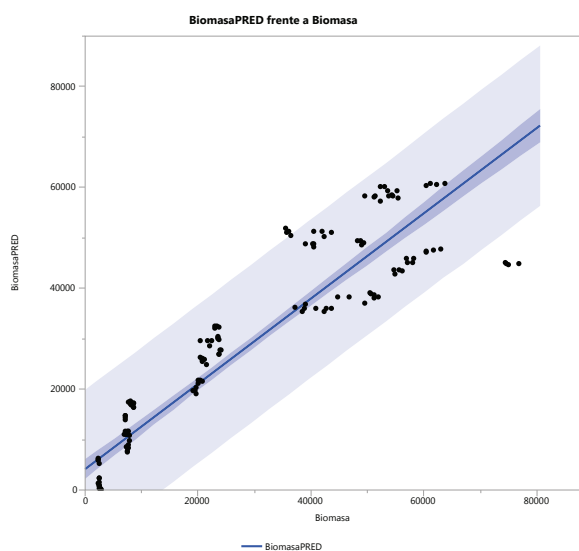


Figura 3. Diagrama de dispersión de la variable Biomasa y su predicción

La Figura 4 muestra los valores que se alcanzan respecto del rendimiento de biomasa en las diferentes rotaciones (épocas de siembra), en color rojo se representan los valores observados durante el montaje de los experimentos en los años 2015 y 2016; mientras que, en color azul, se representan los valores de predicción de los rendimientos. De acuerdo con esto, las mejores épocas de la siembra de maíz para la obtención de biomasa, son la que se realizaron en los meses de octubre y enero de los años antes mencionados.

Tabla 13. Estimaciones de los parámetros

Término	Estimación	Error estándar	Razón t	Prob > t	Extremo inferior del IC al 95%	Extremo superior del IC al 95%
Constante del modelo	-77782,33	12812,43	-6,07	<,0001*	-103090,6	-52474,09
NDIAS_siembra	499,11762	17,43485	28,63	<,0001*	464,67878	533,55645
Ntotal	216837,53	78166,19	2,77	0,0062*	62436,836	371238,22
hrmin	561,56018	112,0847	5,01	<,0001*	340,16066	782,9597

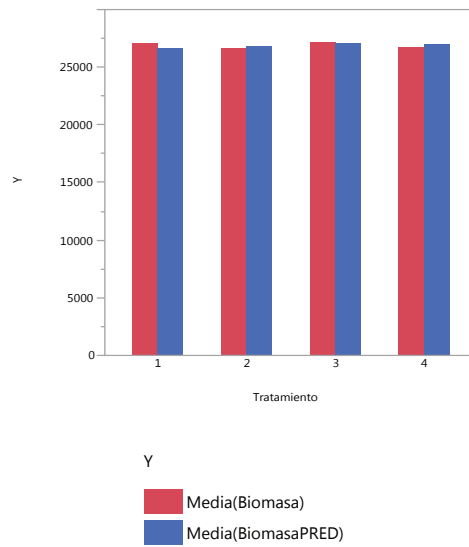
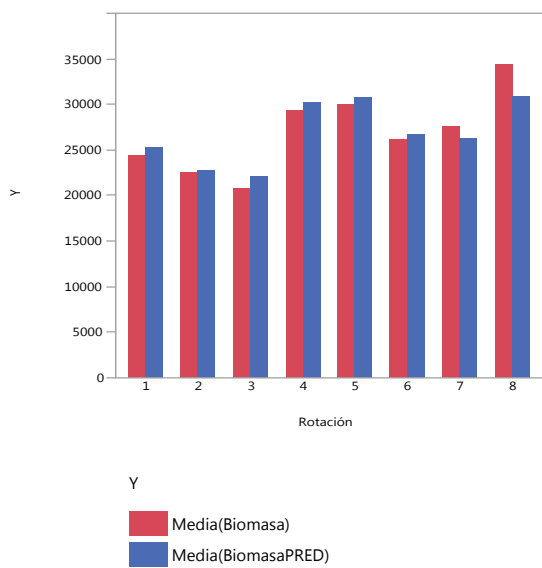


Figura 4. Predicción del rendimiento de Biomasa, respecto de la época de siembra

Figura 5. Predicción de los rendimientos, de biomasa, respecto de la época de siembra

En lo referente a los tratamientos en estudio (Figura 5), no se observa una diferencia en el rendimiento de biomasa, tanto en los datos observados durante el desarrollo del experimento como en la generación del modelo de predicción de rendimiento de biomasa. La asociación de una u otra variedad de maíz local a una leguminosa, produce rendimientos casi muy semejantes, tanto en los datos observados como en los predichos.

la humedad relativa mínima, que es un factor climático que permite alcanzar mayores rendimientos de biomasa del maíz, puesto que, si la misma cae a valores inferiores a los observados en los años 2015 y 2016, disminuye la producción de biomasa ya que el cultivo evapotranspira en mayor proporción y el rendimiento disminuye. Y, finalmente, tenemos el contenido de nitrógeno total en el suelo, sea como aporte de los fertilizantes o como producto de la mineralización de la materia orgánica contenida en el suelo.

CONCLUSIONES

Los días que transcurren desde la siembra influyen en mayor medida que el resto de variables consideradas en el modelo, en el rendimiento de biomasa; si la misma no es aprovechada como forraje, luego de la floración masculina y femenina, los rendimientos tienden a disminuir, con el aumento de los estadios fenológicos. La siguiente variable en el poder predictivo del modelo propuesto es

El mayor rendimiento en biomasa se alcanza cuando el maíz fue plantado en el mes de octubre de 2016, con un valor de 35000 kg ha⁻¹. Estos valores se alcanzan cuando las plantas de maíz en los diferentes experimentos llegan a la floración, que es la mayor altura alcanzada por el cultivo.

En el modelo propuesto entonces tenemos dos tipos de variables, las controlables y las aleatorias. Al primer tipo corresponden las variables: los días que transcurren desde la siembra y el contenido de nitrógeno total en el suelo. Como variable aleatoria tenemos la humedad relativa mínima. El comportamiento de las variables climáticas y en especial la humedad relativa deberá ser investigado en mayor detalle.

No existe diferencia de la interacción entre las variedades locales de maíz con y sin leguminosa (frijol), pues al comparar los valores de biomasa entre lo observado y lo deducido con el empleo de la ecuación de predicción se encuentra en alrededor de 27000 a 35000 kg ha⁻¹. El beneficio de la asociación de gramínea con una leguminosa repercute en los ahorros que se produce para el agricultor y para el ambiente por la no dependencia de insumos externos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmadi, S. Mosallaeepour, E., Akbar Kamgar-Haghighi, A., Sepaskhah, A. R. (2015). Modeling Maize Yield and Soil Water Content with AquaCrop Under Full and Deficit Irrigation Managements. *Water Resour Manage*, 29, 2837–2853. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0973-3>
- Bhattarai, M., Secchi, S., Schoof, J. (2017). Projecting corn and soybeans yields under climate change in a Corn Belt watershed. *Agricultural Systems*, 152, 90–99. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.12.013>
- Bracco, M., Cascales, J., Hernández, J., Poggio, L., Gottlieb, A. M., Lia, V. V., (2016). Dissecting maize diversity in lowland South America: genetic structure and geographic distribution models. *BMC Plant Biology*, 16(1), 186. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0874-5>
- Candelaria, B., Ruíz, O., Gallardo, F., Pérez, P., Martínez, A., Vargas, L. (2011). Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* (Vol. 14). Recuperado de: www.scielo.org.mx/pdf/tsa/v14n3/v14n3a4.pdf
- Caselles, A. (2008). *Modelización y Simulación de Sistemas Complejos*. Publicacions de la Universitat de València.
- Cervantes, L. (2015). *Modelización matemática Principios y aplicaciones* (Primera ed). Mexico: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.2061504>
- FIRA. (2016). *Maíz 2016*. Mexico. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/200637/Panorama_Agroalimentario_Ma_z_2016.pdf
- Flores, H.; Ojeda, W.; Flores, H.; Sifuentes, E.; Mejía, E. (2013). Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) En el norte de sinaloa usando el modelo aquacrop. *Agrociencia*, 47, 347–359. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v47n4/v47n4a4.pdf>
- Hernández, C., Martínez, J., Calvete, H. (2011). Modelos para la simulación dinámica del Crecimiento y desarrollo de pastos. *Pastos*, 41 (2)(January), 127–162.
- Hernández, N., Soto, F., Caballero, A. (2009). Modelos de simulación de cultivos: Características y usos. *Cultivos Tropicales*, 30(1), 73–82. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3356.1207>
- INIAP. (2003). *Catálogo de Recursos Genéticos de Maíces de Altura Ecuatorianos*. (Carlos Yáñez G.; José Luis Zambrano M.; Marlon Caicedo V.; Víctor H. Sánchez A.; Jorge Heredia, Ed.). Quito Ecuador: Instit. Recuperado de: <http://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/handle/41000/43/iniapsc201.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Intriago, R., Gortaire Amézcuca, R., Bravo, E., O'connell, C. (2017). Agroecology in Ecuador: historical processes, achievements, and challenges. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 41(3–4), 311–328. <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1284174>
- Luedeling, E., Smethurst, P. J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N. I., van Noordwijk, M., Ong, C. Mulia, R., Lusiana, B. Muthuri, C., Sinclair, F. L. (2016). Field-scale modeling of tree-crop interactions: Challenges and development needs. *Agricultural Systems*, 142, 51–69. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.11.005>
- Marín-González, O., Parsons, D., Arnes-Prieto, E., Díaz-Ambrona, C. G. H. (2018). Building and evaluation of a dynamic model for assessing impact of smallholder endowments on food security in agricultural systems in highland areas of central America (SASHACA). *Agricultural Systems*, 164(May), 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.02.005>
- Overman, A., Scholtz III, R. (2002). *Mathematical models of crop growth and yield*. CRC Press. New York. Recuperado de: <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1145>
- Overman, A., Scholtz III, R. (2004). Model Analysis for Growth Response of Corn Model Analysis for Growth Response of Corn. *Journal of Plant Nutrition*, 27(5), 885–906. <https://doi.org/10.1081/PLN-120030677>
- Overman, A., Scholtz III, R. (2011). Model of yield response of corn to plant population and absorption of solar energy. *PLoS ONE*, 6(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0016117>
- Pfister, F., Bader, H.-P., Scheidegger, R., y Baccini, P. (2005). Dynamic modelling of resource management for farming systems. *Agricultural Systems*, 86(1),

- 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.08.001>
- Pirasteh-Anosheh, H., Emam, Y., y Pessarakli, M. (2013). Changes in Endogenous Hormonal Status in Corn (*Zea Mays*) Hybrids Under Drought Stress. *Journal of Plant Nutrition*, 36(11), 1695–1707. <https://doi.org/10.1080/01904167.2013.810246>
- Recalde, E. (2016). Anuario Agroclimático años 2009-2015. In Ponticia Universidad Católica del Ecuador sede Ibarra; Consejo de Publicaciones de la Universidad de los Andes Venezuela (Ed.) (Primera, p. 500). Mérida, Venezuela, 2016: Gráficas el Portatítulo Mérida, Venezuela, 2016.
- Santana, F., Granillo, R., Espinoza, F., Aguilar, J., y Ortega, J. (2018). Caracterización de la cadena de valor del maíz. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior de Cd. Sahagún*, 5(9).
- Steduto, P. (2003). Biomass water-productivity comparing the growth-engines of crop models. *FAO Expert Meeting on Crop Water Productivity Under Deficient Water Supply*, 26–28.
- Sumba, L. (2014). Producción Histórica de Maíz Duro Seco. *Magap*, 15.
- Tapia, C. (2015). *Identificación de áreas prioritarias para la conservación de razas de maíz en la sierra de ecuador. Memoria*. Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from http://oa.upm.es/35522/1/CESAR_GUILLERMO_TAPIA_BASTIDAS.pdf
- van der Werf, W., Keesman, K., Burgess, P., Graves, A., Pillbeam, D., Incoll, L., Metselaar, k., Mayus, M., Stappers, R., Kevlen., Palma, T., Dupraz, C. (2007). Yield-SAFE: A parameter-sparse, process-based dynamic model for predicting resource capture, growth, and production in agroforestry systems. *Ecological Engineering*, 29(4), 419–433. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.017>
- Wang, R., Bowling, L. C., y Cherkauer, K. A. (2016). Estimation of the effects of climate variability on crop yield in the Midwest USA. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.001>