



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Instituto de Conservación y Mejora  
de la Agrodiversidad Valenciana

Máster Universitario en Mejora Genética Vegetal

**Estudio de la actividad enzimática del  
suelo bajo condiciones de cultivo ecológico  
y convencional en una colección de  
pimientos y chiles (*Capsicum spp.*)**

**Presenta Trabajo Final de Máster:**

Ivan Ilich Morales Manzo

**Directores académicos:**

Adrián Rodríguez Burruezo

María Dolores Raigón Jiménez

**Director experimental:**

Ana María Ribes Moya

Valencia. Septiembre 2017

# ÍNDICE GENERAL

## 1. INTRODUCCIÓN

<b>1.1 IMPORTANCIA ECONÓMICA DEL PIMIENTO</b>	<b>1</b>
<b>1.2 MORFOLOGÍA, FISIOLOGÍA Y MANEJO DEL CULTIVO</b>	<b>4</b>
<b>1.3 TAXONOMÍA, DOMESTICACIÓN Y DIFUSIÓN DEL PIMIENTO Y ESPECIES AFINES</b>	<b>7</b>
1.3.1 TAXONOMÍA	7
1.3.2 ORIGEN, DOMESTICACIÓN Y DIFUSIÓN DE CAPSICUM SPP.	15
<b>1.4 DIVERSIDAD DE TIPOS VARIETALES, PRIORITARIAMENTE C. ANNUM Y ESPECIES AFINES</b>	<b>17</b>
1.4.1 CLASIFICACIÓN EN ESTADOS UNIDOS	18
1.4.2 CLASIFICACIÓN EN MÉXICO	18
1.4.3 CLASIFICACIÓN EN LA EUROPA MEDITERRÁNEA OCCIDENTAL	19
<b>1.5 CARACTERES DE INTERÉS EN LA MEJORA DEL PIMIENTO: ADAPTACIÓN A CONDICIONES DE BAJOS INSUMOS</b>	<b>20</b>
1.5.1 USO EFICIENTE DEL FÓSFORO	20
1.5.2 DEFENSA CONTRA EL ESTRÉS OXIDATIVO	21
<b>1.6 GENERALIDADES DEL CULTIVO ECOLÓGICO</b>	<b>22</b>
1.6.1 MERCADO DEL CULTIVO ECOLÓGICO	23
1.6.2 CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO ECOLÓGICO	25
<b>1.7 IMPORTANCIA DE LA FERTILIDAD DEL SUELO DENTRO DEL CULTIVO ECOLÓGICO</b>	<b>27</b>
1.7.1 DETERMINACIÓN DE LA FERTILIDAD DEL SUELO	29
1.7.1.1 FOSFATASA ALCALINA. MINERALIZACIÓN DEL FOSFORO ORGÁNICO	30
1.7.1.2 CATALASA. REDUCCIÓN DEL PERÓXIDO, AGENTES OXIDANTES Y FAUNA MICROBIANA	30

## 2. OBJETIVOS **32**

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1 MATERIAL VEGETAL</b>	<b>33</b>
<b>3.2 CONDICIONES DE CULTIVO</b>	<b>34</b>
3.2.1 CULTIVO ECOLÓGICO	34
3.2.2 CULTIVO CONVENCIONAL	34
<b>3.3 MUESTREO</b>	<b>35</b>
<b>3.4 DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS</b>	<b>36</b>
<b>3.5 ANÁLISIS DE ACTIVIDAD ENZIMÁTICA EN SUELO</b>	<b>37</b>
3.5.1 ACTIVIDAD DE LA FOSFATASA ALCALINA	37
3.5.2 ACTIVIDAD DE LA CATALASA	38

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

<b>4.1 ANÁLISIS DE LA VARIANZA (ANOVA) EN LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ALCALINA Y LA CATALASA</b>	<b>40</b>
<b>4.2 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ALCALINA POR ACCESIÓN Y CADA SISTEMA DE CULTIVO</b>	<b>44</b>
4.2.1 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ALCALINA A MITAD DEL CULTIVO	44
4.2.2 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ALCALINA AL FINAL DEL CULTIVO	45
4.2.3 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ALCALINA EN LA RIZOSFERA	45
<b>4.3 ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA FOSFATASA ALCALINA ENTRE SISTEMAS DE CULTIVO Y CONDICIONES DE MUESTREO</b>	<b>48</b>
<b>4.4 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA CATALASA POR ACCESIÓN Y CADA SISTEMA DE CULTIVO</b>	<b>51</b>
4.4.1 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA CATALASA A MITAD DEL CULTIVO	51
4.4.2 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA CATALASA AL FINAL DEL CULTIVO	52
4.4.3 ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA CATALASA EN LA RIZOSFERA	53
<b>4.5 ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS EN LA ACTIVIDAD ENZIMÁTICA DE LA CATALASA ENTRE SISTEMAS DE CULTIVO Y CONDICIONES DE MUESTREO</b>	<b>55</b>
<b>5. CONCLUSIONES</b>	<b>58</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>60</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	<b>66</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	<b>68</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Importancia económica del pimiento

Hoy en día, el cultivo de las especies pertenecientes al género *Capsicum* se ha extendido prácticamente a todo el mundo, siendo nativas de América (Nuez *et al.*, 2003), convirtiéndose en una solanáceas más de gran importancia, con casi dos millones de hectáreas cultivadas en el mundo (Tabla 1). Principalmente, su consumo es dentro de la gastronomía mundial, ya sea como producto fresco o seco, como hortaliza o condimento (sea colorante, saborizante o incluso conservante). Desde tiempos prehispánicos era valorado como fuente de vitamina C en el continente americano, así como por su alto contenido de antioxidantes, esta última una característica de la dieta tradicional de los nativos americanos que en la actualidad se ha revalorizado dándole el carácter de alimento nutracéutico. Ha sido tal su diversificación que incluso se conocen variedades de tipo ornamental, aprovechando coloraciones exóticas tanto en hojas, como en frutos. En la industria cosmética, sus pigmentos son aprovechados también como una opción más amigable con el medio, (Lahbib *et al.*, 2012).

**Tabla 1.** Área cultivada en hectáreas y producción en miles de toneladas a nivel mundial de las principales hortalizas en 2014. (FAOSTAT, 2017).

Hortaliza	Área cultivada (ha)	Producción (1000 t)
Cebolla	5.298.873	88.475
Tomate	5.023.810	170.750
Sandía	3.477.439	111.009
Coles	2.470.275	71.778
Guisante verde	2.356.340	17.426
Pepino	2.178.613	74.975
Calabaza	2.004.058	25.196
Pimiento	1.937.370	32.324
Berenjena	1.870.728	50.193
Judía verde	1.527.613	21.720

Entre los líderes a nivel mundial, encontramos al continente asiático como el que tiene la mayor área dedicada al cultivo del pimiento, quienes dominan con más del 60% del total

mundial (FAOSTAT, 2017). Este continente no solo domina en lo relacionado al área sembrada, sino también a nivel productivo, con casi el 70% de la producción total mundial. El segundo continente es África, con un 18,75% del área sembrada a nivel mundial, pero alcanzado el tercero en producción mundial en cuanto a producción, 9,97%, esto debido a sus bajos rendimientos, que comparativamente son los más bajos a nivel mundial (Tabla 2).

El caso de América (sitio de origen y mayor diversificación del género) queda en un tercer lugar, con el 11,43% de la superficie sembrada a nivel mundial, aunque en términos productivos, alcanza el segundo lugar con un 13,31% del total. Para Europa, el escenario es muy diferente, ya que, aun cuando ocupa el cuarto lugar tanto en área sembrada como en producción, con el 5,48% y un 9,25% respectivamente, sus rendimientos son los más altos en comparación con el resto del mundo (Tabla 2). Al revisar la producción, pero a nivel país, China aparece como el líder con un 49,95% a nivel mundial. En segundo lugar, encontramos a México con 8,45%, y después a Turquía (6,58%), Indonesia (5,8%), España, en quinto lugar, con el 3,5% y EE. UU. con 2,83% de la producción mundial (Figura 1). En lo que se refiere a la producción en seco, está centrada en países asiáticos, destacando la India (39%), Tailandia (8%) y China (8%) (Figura 2).

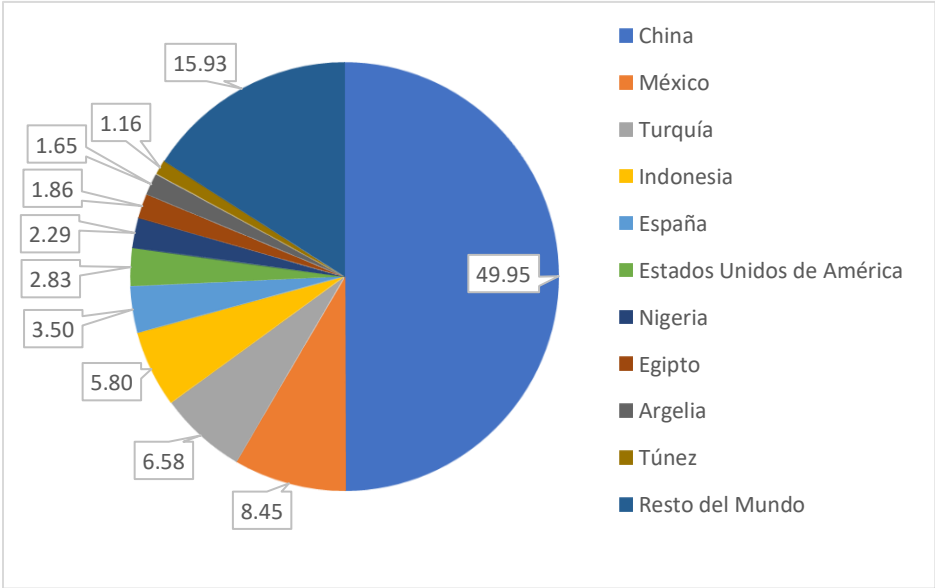


Figura 1. Porcentaje de la producción mundial por país de chile fresco, 2014 (FAOSTAT, 2017)

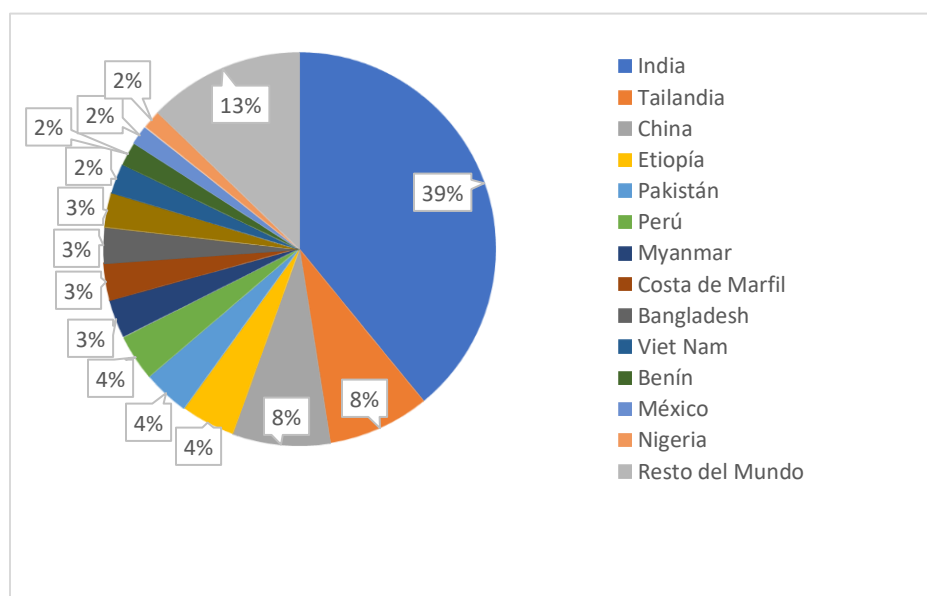


Figura 2. Porcentaje de la producción mundial de chile seco por país, 2014 (FAOSTAT, 2017)

Tabla 2. Área cultivada en hectáreas y producción en toneladas de pimienta en fresco en los diferentes continentes y su porcentaje respecto al mundial en 2014. (FAOSTAT, 2017).

	Área cultivada (ha)	Porcentaje (%)	Producción (t)	Porcentaje (%)	Rendimiento (t/ha)
<b>Asia</b>	1.243.790	64	21.757.606	67	17,49
<b>África</b>	363.211	19	3.221.701	10	8,87
<b>América</b>	221.477	11	4.303.419	13	19,43
<b>Europa</b>	106.233	5	2.990.230	9	28,15
<b>Oceanía</b>	2.658	0.1	51.390	0,2	19,33
<b>Mundial</b>	1.937.369	100	32.324.346	100	-

En el caso de España, en el año 2016 fueron sembradas 19,468 hectáreas para pimienta, alcanzando 1.172.639 toneladas producidas (Tabla 3). A nivel de comunidades autónomas, el liderazgo lo lleva Andalucía, con 757,893 toneladas para 2016, en segundo lugar, Murcia, Galicia, la Comunidad Valenciana y Castilla la Mancha (Tabla 3). Como se puede ver, a partir de los datos anteriores, es España quien lidera la producción en Europa (y de la UE) con una participación del 3,5% en la producción mundial. En el ámbito de las exportaciones, España exportó en el año 2013 583.827 toneladas, dándole el segundo lugar para este cultivo entre los países exportadores (FAOSTAT, 2017). Con este escenario económico, podemos visualizar mejor su gran importancia para el sector agrícola de España,

sector compuesto por muchos agricultores, cooperativas, empleados de plantas de procesado y sus familias, quienes dependen directa o indirectamente de este cultivo.

**Tabla 3. PIMIENTO: Análisis provincial en España de superficie (hectáreas), rendimiento (kilogramos por hectárea) y producción (toneladas), 2016 (MAPAMA, 2017).**

Comunidades Autónomas	Superficie (ha)				Rendimiento (kg/ha)			Producción (t)
	Secano	Regadío		Total	Secano	Regadío		
		Aire libre	Protegido			Aire libre	Protegido	
Andalucía	82	1.654	10.096	11.832	7.429	29.269	70.213	757.893
Aragón	–	131	–	131	–	16.947	–	2.22
Asturias	41	10	–	51	8	15	–	478
Baleares	–	60	30	90	–	22.15	38	2.469
Canarias	5	55	172	232	10	38.8	80.64	16.072
Cantabria	7	–	–	7	16	–	–	112
Castilla-La Mancha	2	1.185	–	1.187	15	39.154	–	46.428
Castilla y León	–	144	7	151	–	21.672	28	3.317
Cataluña	2	250	22	274	3.9	22.023	46.151	6.529
Euskadi	112	131	50	293	8.629	16.302	32.996	4.752
Extremadura	–	560	12	572	–	37.735	229.58	23.886
Galicia	–	560	642	1.202	–	52.302	56.401	65.499
La Rioja	–	198	4	202	–	29	40	5.902
Madrid	–	11	1	12	–	27	50	347
Murcia	–	150	1.22	1.37	–	48.636	111.6	143.447
Navarra	–	1.033	10	1.043	–	34.53	59.85	36.268
Valencia	–	444	375	819	–	37.81	107.285	57.02
<b>España</b>	<b>251</b>	<b>6.576</b>	<b>12.641</b>	<b>19.468</b>	<b>8.38</b>	<b>34.613</b>	<b>74.591</b>	<b>1.172.639</b>

## 1.2 Morfología, fisiología y manejo del cultivo

De acuerdo con Nuez *et al.* (2003) “El pimiento se cultiva como una herbácea anual. Su aspecto es lampiño, de tallos erguidos y de crecimiento limitado, con altura y forma de desarrollo muy variables en función del cultivar y de las condiciones de cultivo”, “es más exigente en condiciones agroclimáticas” que otras solanáceas, “aunque algunos tipos de fruto pequeño son muy rústicos y se adaptan a condiciones más extremas.”

Tiene hojas enteras, con un largo peciolo o casi sésiles, con forma entre lanceolada y ovada. El borde es entero y a veces ligeramente sinuado en la base. Las flores suelen nacer solitarias en cada nudo, con el pedúnculo torcido hacia abajo en la antesis. El cáliz, de una



sola pieza, está formado por sépalos verdes que persisten y se endurecen hasta madurar el fruto. La corola es usualmente blanca lechosa, con la base de los pétalos formando un tubo muy corto. El fruto es una baya hueca, con la superficie lisa y brillante, de color y forma muy variables y característicos del cultivar. En el interior de la baya discurren 2 o 4 tabiques incompletos a lo largo de la pared del fruto, uniéndose solo en la base sobre la placenta (*ibid.*).

De acuerdo con Maroto (2002), el ciclo de cultivo puede dividirse en tres fases:

Germinación

Crecimiento vegetativo

Floración

Fructificación y maduración

En general no se considera el pimiento como una especie con latencia seminal, sin embargo, es común que sus semillas tarden más de lo normal en producir la emergencia. Según Watkins y Cantliffe (1983), esto puede acelerarse con el uso de giberelinas a 25°C, aunque también señalan que la variedad, la edad del fruto de procedencia y las condiciones de almacenamiento influyen en los tiempos.

Se considera que la planta alcanza la madurez cuando tiene entre 8 y 12 hojas, que es cuando inicia la floración. Durante esta etapa, temperaturas nocturnas frescas, alrededor de los 12°C, incrementan el número de flores. Pero temperaturas menores a 8 o 10°C disminuyen la viabilidad del polen, entorpeciendo la fecundación, favoreciendo la aparición de frutos partenocárpicos, con o sin semillas y de menor tamaño. Este tipo de temperaturas también afecta a cultivares con frutos cuadrados, generando deformaciones y, en el caso de cultivares cilíndricos, los hace más alargados. En el otro extremo, temperaturas altas provocan no solo el aborto de flores y frutos, sino también deficiencias nutrimentales por los cambios en el movimiento de los mismos dentro de la planta en dadas condiciones.

El pimiento, en especial sus variedades dulces, tienen unas exigencias en temperatura mayores que el tomate. Sus temperaturas óptimas diurnas rondan entre 20-25°C, las nocturnas entre 16-18°C. Debajo de los 10°C dejan de crecer. Los más exigentes en este aspecto son los tipo *California*. Por encima de los 35°C se produce el aborto floral. Entre las

variedades picantes, la demanda es más por temperaturas inferiores, aunque al existir una gran gama varietal, esto es bastante variable.

En lo que se refiere a la humedad relativa, su óptimo se encuentra entre 50-70%. De acuerdo con Thompson y Kelly (1957), el pimiento es muy sensible a condiciones de alta o muy alta evapotranspiración, produciendo la caída de flores y frutos cuando la temperatura es elevada y la humedad relativa baja.

Los suelos idóneos deben ser profundos, ricos, bien aireados y, muy importante, bien drenados, donde no ocurra ningún tipo de encharcamiento. La acidez puede llegar hasta un pH de 5,5, pero en cultivo enarenado, hasta 8. En comparación con el tomate, es menos resistente a la salinidad.

La siembra se realiza en semilleros, sean tipo cama o en charolas con celdas bien delimitadas, este último es el ideal ya que se obtiene mayor precocidad al realizar el trasplante con el cepellón que a partir de raíz desnuda.

El marco de plantación en el trasplante puede rondar entre 75-90cm entre surcos y 40-50cm entre plantas, aunque esto puede ser modificado de acuerdo con las necesidades del proyecto.

Dentro de las labores culturales más importantes, encontramos que la realización del aporcado de la planta y podas, en primer lugar, eliminando los brotes en las hojas más bajas y posteriormente retirando estas hojas hasta la primera bifurcación. De esta manera se evita, desde un inicio el contacto directo de la base del tallo con el agua de riego y, en un segundo momento, que esta misma parte no este lo suficientemente aireada, suele ser el sitio de entrada para algunos de los hongos que más afectan a este cultivo. Cuando se presenta un desarrollo vegetativo excesivo, hay que eliminar algunas ramas, cuidando así el aireado del follaje. Por otro lado, con la presencia de los frutos, el peso puede llegar a rasgar la planta, por ello se debe realizar el tutorado previo e incluso el clareo de flores o frutos, esto último también para cuidar el calibre y la calidad del producto.

Posterior al trasplante, suelen pasar entre 70 y 90 días hasta iniciar la cosecha, esta se lleva a cabo manualmente, con periodos entre una y otra de 7-12 días. Puede cosecharse en

verde al alcanzar la talla buscada o hasta que vire a su color definitivo, rojo, morado, amarillo o anaranjado.

### 1.3 Taxonomía, domesticación y difusión del pimiento y especies afines

#### 1.3.1 Taxonomía

Todos los términos pimientos, chiles, ajíes, guindillas, chile pepper, tabasco, etc., hacen referencia a los frutos de las plantas del género *Capsicum*, este género se ubica en la familia Solanaceae, subfamilia Solanoidae, junto con los géneros *Acnistus*, *Athenea*, *Brachistus*, *Vassovia*, *Withania* y *Witheringia*. Pertenece a la tribu Capsiceae, al igual que el género *Lycianthes*. Dentro de *Capsicum*, están incluidas 31 especies reconocidas (Tabla 4) en el 2007 por CONABIO (Montes, 2010).

**Tabla 4.** Especies del género *Capsicum*, su condición cultivada (C) o silvestre (S); el grupo al que pertenecen considerando color de flor (Fb=blanca; Fp=púrpura) y su agrupación filial artificial (GCA=Complejo *C. annuum*; GCB=Complejo *C. baccatum*; GCP=Complejo *C. pubescens*), así como su distribución geográfica (Montes, 2010).

No.	Especie	Condición	Distribución
1	<i>C. annuum</i> L.	C; Fb; GCA	Pantropical, ampliamente distribuida y cultivada principalmente en países subtropicales y templados y el mundo en general
	<i>C. annuum</i> var. <i>annuum</i>		
	<i>C. annuum</i> var. <i>glabriusculum</i> (Dunal) Heiser & Pickersgill [sinónimo <i>C. annuum</i> var. <i>aviculare</i> aust.]	S; Fb; GCA	Desde el sur de Estados Unidos a Perú y Norte de Brasil
2	<i>C. baccatum</i> L.	C; Fb; GCB	Perú, Bolivia, Paraguay, Brasil, Argentina
	<i>C. baccatum</i> var. <i>pendulum</i> (Willd.) Eshbaugh		Cultivado en USA, México, Costa Rica, Sudamérica e India
	<i>C. baccatum</i> var. <i>baccatum</i>	S; Fb; GCB	Colombia, Perú, Bolivia, Paraguay, Brasil y Argentina

	<i>C. baccatum</i> var. <i>umbilicatum</i> (Vell.) Hunz. & Barboza	C; Fb; GCB	Cultivado en USA, México, Jamaica, Perú, Bolivia, Brasil, Paraguay, Argentina
3	<i>C. caballeroi</i> M. Nee	S	Bolivia
4	<i>C. campylopodium</i> Sendt.	S (n=13)	Brasil
5	<i>C. cardenasii</i> Heiser & Smith	S; Fp; GCP	Bolivia
6	<i>C. ceratocalyx</i> M. Nee	S	Bolivia
7	<i>C. chacoense</i> Hunz.	S; Fb; GCB	Norte y Centro de Argentina, Paraguay, Bolivia
8	<i>C. chinense</i> Jacq.	C; Fb; GCA	Cultivado en USA, México, Central América, Ecuador, Perú, Bolivia, Brasil, Argentina, China, Japón, África occidental
9	<i>C. coccineum</i> (Rusby) Hunz	S	Perú, Bolivia y Sur de Brasil
10	<i>C. cornutum</i> (Hiern.) Hunz (sinónimo <i>C. dusenii</i> Bitter)	S (n=13)	Brasil
11	<i>C. dimorphum</i> (Miers) Kuntze.	S	Colombia, Ecuador
12	<i>C. eximium</i> Hunz.	S; Fp; GCP	Sur de Bolivia, norte de Argentina
13	<i>C. flexuosum</i> Sendt.	S	Paraguay, Sur y SE de Brasil, NE Argentina
14	<i>C. friburgense</i> Bianchetti & Barboza	S (n=13)	Brasil
15	<i>C. frutescens</i> L.	C; Fb; GCA	Cultivado en USA, México, Centro y Sudamérica, África, India, China, Japón
16	<i>C. galapagoense</i> Hunz.	S; Fb; GCA	Ecuador, Islas Galápagos
17	<i>C. geminifolium</i> (Dammer) Hunz.	S	Colombia, Ecuador, Perú
18	<i>C. hookerianum</i> (Miers) Kuntze	S	Sur de Ecuador y Norte de Perú
19	<i>C. hunzikerianum</i> Barboza & Bianchetti	S	Brasil
20	<i>C. lanceolatum</i> (Greenm.) Morton & Standley	S (n=13)	México, Guatemala
21	<i>C. mirabile</i> Mart. ex Sendt (sinónimo <i>C. buforum</i> Hunz)	S (n=13)	Brasil
22	<i>C. parvifolium</i> Sendtn	S	Colombia, Venezuela, NE Brasil
23	<i>C. pereirae</i> Barboza & Bianchetti	S (n=13)	Brasil
24	<i>C. praetermissum</i> Heiser & Smith [sinónimo <i>C. baccatum</i> var. <i>praetermissum</i> (Heiser & Smith.) Hunz.]	S	Centro y Sur de Brasil, Paraguay
25	<i>C. pubescens</i> Ruíz & Pav.	C; Fp; GCP	Cultivado en México, Centro y Sudamérica
26	<i>C. recurvatum</i> Witas.	S (n=13)	Brasil

27	<i>C. rhomboideum</i> (Dunal) Kuntze [sinónimo <i>C. ciliatum</i> (Kunth) Kuntze]	S (n=13)	México, Guatemala, Honduras, Colombia, Venezuela, Ecuador, Perú
28	<i>C. schottianum</i> Sendt.	S (n=13)	Brasil
29	<i>C. scolnikianum</i> Hunz.	S	Ecuador, Perú.
30	<i>C. tovarii</i> Eshbaugh, Smith & Nickrent	S; Fb; GCB	Perú
31	<i>C. villosum</i> Sendt.	S (n=13)	Brasil

Debido a los distintos enfoques entre autores dentro de la taxonomía del grupo y de las especies domesticadas, existen diferencias en las propuestas de cada uno, pero para efectos prácticos, se tomarán como cultivadas estas:

*C. annuum* Linneo, Species Plantarum, 188-189. 1753. Todos los autores recientes han aceptado a esta especie y ha habido también bastante acuerdo en reconocer sus límites, aunque en un tiempo fue confundida con *C. frutescens* (Heiser y Pickersgill, 1969).

***C. annuum* var. *annuum***

Con este nombre se reconoce toda la diversidad domesticada de esta especie. Se distingue de las otras especies cultivadas por la presencia de un cáliz dentado y una flor blanca grande en cada nudo. Su descripción taxonómica es la siguiente:

Plantas herbáceas o arbustivas de 1.5 m de alto, perennes o anuales, principalmente glabras: flores solitarias, raramente en pares, ocasionalmente fasciculadas, sin constricción en la base del cáliz y pedicelo, aunque a veces un poco rugoso; cáliz dentado, ausente o rudimentario; corola de color blanco a azul, raramente violeta, sin manchas difusas en la base de los pétalos (Figura 3); pétalos usualmente rectos; anteras normalmente de color azul a violeta, filamentos cortos; frutos inmaduros de color verde y rojos, cuando maduros de color naranja y púrpura-amarillo, persistentes, pendientes, raramente erectos, variables en su tamaño y forma; semillas de color crema a amarillo (D'Arcy y Eshbaugh, 1974).



*Figura 3. Flor característica y variabilidad de frutos de C. annuum*

*C. baccatum* Linneo. Mantisa Plantarum, 1:47. 1767. Frecuentemente se ha usado el nombre de *C. pendulum* para referirse a esta especie, la cual se caracteriza por la presencia de una corola blanca con manchas amarillas en la base.

***C. baccatum* var. *pendulum***

Datos arqueológicos encontrados en Perú, señalan el cultivo temprano de *C. baccatum* var. *pendulum* muestran una edad de 2500 años a.C. (Pickersgill, 1969), la cual se reconoce como la región con mayor posibilidad de ser su origen. Es conocido como "ají escabeche" en Perú y "asta de toro" en Bolivia (Eshbaugh, 1975). Su descripción taxonómica es la siguiente:

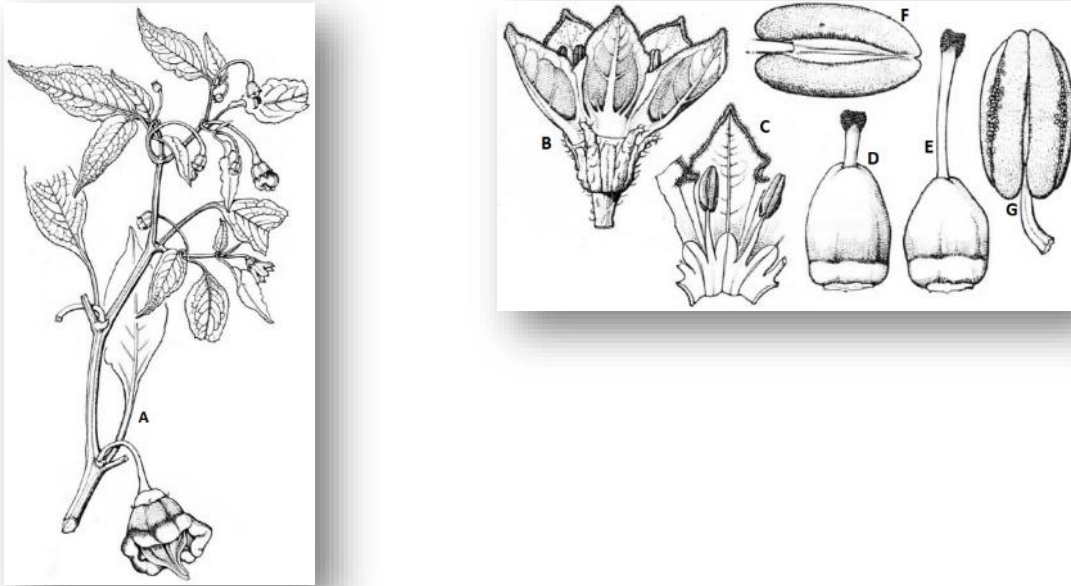
Hierbas o pequeños arbustos extendidos de 1-1.5 m de alto, principalmente glabros, algunas veces pubescentes; una flor por nudo, raramente dos o más; pedicelos erectos o pendientes en la antesis; cáliz ciatiforme con distintos dientes de 0.5-1.5 mm de largo; corola rotada, radio de 7.4-12 mm, de color crema a blanco o blanco-verdosa, con manchas amarillas a verdes difusas en la base de cada lóbulo (Figura 4); anteras amarillas, filamentos muy largos de 2.6-4.2 mm: frutos de color café, rojo, naranja, o amarillo limón, pendientes, muy raramente erectos, persistentes, de pulpa firme, de varias formas, normalmente alargados, muy raramente globosos; semillas de color crema a amarillo (D'Arcy y Eshbaugh, 1974).



Figura 4. Flor característica y variabilidad de frutos de *C. baccatum* var. *pendulum*

### ***C. baccatum* var. *umbilicatum***

Cultivado en USA, México, Jamaica, Perú, Bolivia, Brasil, Paraguay y Argentina. “Hierba de 1,60-1,80 m de altura. Tallos 3-4 costados, con diminuta pubescencia. Laminas ovadas, con base atenuada y desigual, ápice acuminado, margen ciliado (Figura 5), epífilo glabrescente, hipófilo con densa pubescencia patente a lo largo del nervio medio, de 5-12 (14,5) cm de longitud, 3-4,6 cm de ancho; peciolo de 2,8-7,5 cm. Corola blanca con manchas verde oscuras en la mitad inferior de los lóbulos y parte del limbo. Gineceo con dimorfismo estilar; ovario 3-4 carpelar. Bayas péndulas, de color rojo, embonado-umbilicadas (es decir, con su ápice a modo de una prominencia aguda que surge de una depresión central a la altura media del fruto), de 3-4 cm de largo, 3,7-4,9 cm de ancho. Semillas discoidales, comprimidas de color amarillo pálido, de 3,5-4,2 mm de largo, 3,1-3,5 mm de ancho, con el episperma finamente reticulado” (Hunziker, 1998). El fruto se diferencia considerablemente de las otras variedades, pero el carácter más conspicuo distintivo del resto es la ausencia de células gigantes en la hipodermis interna, el estrato más interno del mesocarpio (ibid.).



*Figura 5. A: Rama Fructífera; B: Flor vista lateral; C: Sector de la corola desplegada; D y E: Gineceo, brevistilado y longistilado, respectivamente; F y G: Anteras, vista dorsal y ventral, respectivamente; C. baccatum var. Umbilicatum, por N. de Flury*

### ***C. chinense***

Hortus Botanicus Vindobonensis, 3.38, t. 67.1776. Smith y Heiser (1957) fueron quienes caracterizaron a esta especie refiriéndose a ella como *C. sinense*. Su descripción taxonómica es la siguiente:

Arbustos pequeños de hasta 1.5 m de alto, glabros a pubescentes; dos o más flores por nudo, ocasionalmente solitarias, pendientes (raramente erectas); cáliz del fruto maduro carece de dientes y presenta una marcada constricción anular en su base (Figura 6); corola blanca-verdosa o verde-amarillenta (ocasionalmente blanca lechosa o púrpura); sin manchas difusas en la base de los pétalos; pétalos de la corola usualmente rectos; anteras de color violeta a azul, raramente amarillas (Smith y Heiser, 1957); frutos pendientes, persistentes, de pulpa firme, de colores café rojo, melocotón, amarillo naranja, amarillo limón, o crema, de varias formas; semillas de color crema a amarillo (D'Arcy y Eshbaugh, 1974). En Latinoamérica el cultivo de esta especie está muy extendido, conocida por los chiles de tipo “Habanero”. Tiene dos o más flores por nudo (en ocasiones solitarias). La carne del fruto es firme y las semillas color amarillo claro.





Figura 6. Flor característica y frutos mostrando la característica constricción anular de *C. chinense*

### *C. frutescens*

Species Plantarum 1:189. 1753. Este nombre se ha usado muchas veces para referirse a materiales que hoy se consideran dentro de *C. annuum* o *C. baccatum* (Heiser y Pickersgill, 1969). El concepto de *C. frutescens* que se acepta es el propuesto por Heiser y Smith (1953) y Smith y Heiser (1957). Esta especie está muy relacionada con *C. chinense*. Pickersgill (1969). indica que ningún carácter aislado es suficiente para distinguir entre ambas especies, sin embargo, es posible hacerlo mediante una combinación de caracteres. Al respecto, Baral y Bosland (2004), utilizando diversos estadísticos para delimitar ambas especies (*C. frutescens* y *C. chinense*) encontraron que ambos taxa representan dos especies aisladas y distintas entre sí.

Su descripción taxonómica es la siguiente: Hierbas o arbustos pequeños, de hasta 2 m de alto, glabros a pubescentes, en su mayor parte finamente pubescentes; con dos o más flores por nudo, raramente una, erectas; no tiene constricción en la base del cáliz y el pedicelo; cáliz dentado o ausente; corola blanco verdosa (Figura 7); anteras azul a violeta raramente amarillas; fruto inmaduro verde sin, pigmentación oscura, fruto maduro pendientes y deciduos, con pulpa frecuentemente blanda; semillas de color crema a amarillo (D'Arcy y Eshbaugh, 1974).

El centro de origen de *C. frutescens* está también en Sudamérica, los vestigios arqueológicos encontrados en Perú datan de 1200 años a.C. (Pickersgill, 1969) y su distribución se da muy similar a *C. chinense* y se encuentra desde México hasta Sudamérica.



*Figura 7. Flor característica y frutos aun en planta de C. frutescens.*

### ***C. pubescens***

Flora Peruviana et Chilensis, 2:30. 1797. Esta especie es claramente distinta del resto de las especies cultivadas por lo que no ha habido problemas para su clasificación. Su descripción taxonómica es la siguiente:

Plantas herbáceas o arbustos de hasta 3 m de alto, planta y follaje glabros a densamente pubescentes, tallos frecuentemente estriado, nudos frecuentemente de color púrpura oscuro; hojas ovaladas, frecuentemente rugosas, margen suave o ciliado: flores normalmente solitarias; cáliz con 5 ó 6 dientes conspicuos, deltoides, de alrededor de 1 mm de largo; corola rotada a raramente semicampanulada, violeta con el centro blanco (Figura 8); anteras púrpura a violeta, estilo frecuentemente con estigma verde: fruto rojo, naranja, amarillo naranja, amarillo limón, o café, globoso o alargado, pendiente, raramente erecto, y en algunos casos con un cuello prominente; semillas negras o café oscuro (amarillas cuando están inmaduras), prominentemente reticuladas (D'Arcy y Eshbaugh, 1974).



*Figura 8. Flor característica y frutos de con semillas oscuras características de C. pubescens*

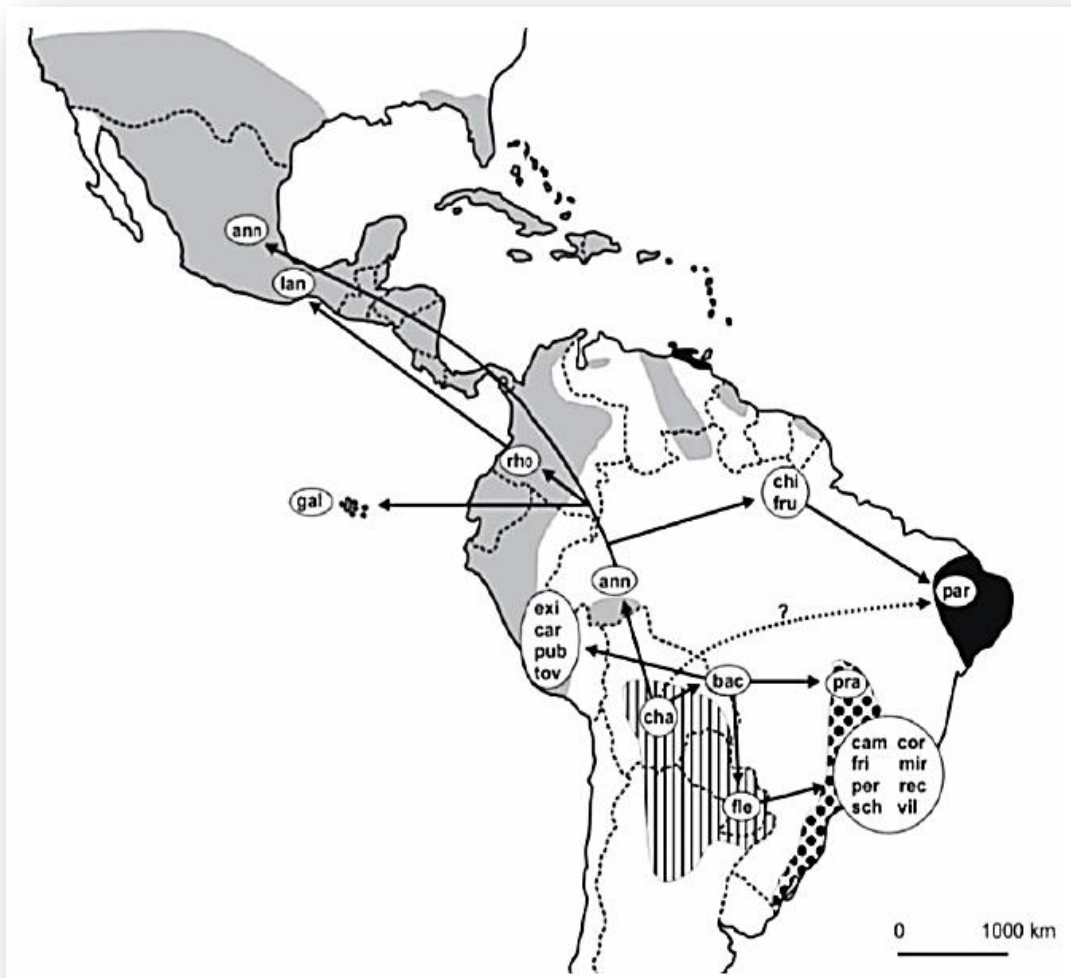
### 1.3.2 Origen, domesticación y difusión de *Capsicum spp.*

Todas las especies del género *Capsicum* son originarias de América. La distribución precolombina de este género se extendió probablemente desde el borde más meridional de los Estados Unidos a la zona templada cálida del sur de Sudamérica (Heiser, 1964). Respecto al origen de este género, una hipótesis de las más aceptadas, sobre el lugar y modo de evolución de las especies de *Capsicum*, sugieren que una porción importante del género se originó en un «área núcleo» en Bolivia surcentral, con subsiguiente migración a los Andes y tierras bajas de la Amazonía acompañada por radiación y especiación (McLeod *et al.*, 1982). La hipótesis se basa en información geográfica y datos de electroforesis de la enzima glutamato oxalacetato transaminasa (GOT), que presentó un patrón de bandeo similar a accesiones de *C. eximium* y *C. chacoense* procedentes del área nuclear, siendo menor el número de bandas de accesiones de estas especies exteriores al área y las correspondientes a otras especies. Los autores proponen que *C. chacoense* o un ancestro suyo dio lugar tanto a los grupos de flores blancas como al grupo de flores púrpura.

El grupo de flores púrpura (*C. eximium*) habría emigrado a las tierras altas de los Andes, con la consecuente selección direccional que habría dado lugar a *C. cardenasii* por efecto fundador y a *C. pubescens* como especie domesticada. El grupo de flores blancas habría migrado fuera del área nuclear a través del río Mizque, que vierte en tributarios del Amazonas. El flujo de estas aguas es a través de las tierras bajas de la Bolivia tropical y de la cuenca amazónica. El ancestro que originó el grupo de flores blancas dio lugar a *C. baccatum* en el área relativamente seca del sur de Bolivia; la forma silvestre seguiría migrando por el sistema fluvial y en la húmeda cuenca amazónica daría lugar al progenitor silvestre del complejo *C. annum*.

Los hallazgos de restos arqueológicos de estas especies complementan la anterior propuesta. Aunque ha sido difícil determinar exactamente a que especie se refieren las diversas reminiscencias encontradas en la cueva Guitarrero en Perú, que está localizada en un valle intermontano, sobre la vertiente oeste de los Andes, a 2,580 m de altura, que fue excavada por Thomas Lynch y publicada en 1980. Tiene un registro de 12000 años de antigüedad. En la base se encontró un cuchillo de dos caras de hace 12500 años. Restos de

*Phaseolus vulgaris*, *P. lunatus*, *Oxalis*, *Capsicum*, *Solanum hispidum*, *Cucurbita sp.*, *Inga sp.* y algunas otras plantas fueron encontradas más arriba, en el complejo II, fechado entre 8600-5600 a.C. El frijol y el chile procedían del nivel II a, entre 8600-8000 a.C., y eran de tipos domesticados. En consecuencia, parece que se produjo una domesticación de *Capsicum* antes de 8000 años a.C. (Bird, 1948, Perry et al., 2007). Los chiles silvestres se encuentran en las laderas orientales de los Andes. Probablemente fueron domesticados allí e introducidos posteriormente en la vertiente occidental (Harlan, 1992) (Figura 9).



**Figura 9.** Esquema geográfico de la especiación de *Capsicum* de acuerdo con Montes (2010). Abreviación de los nombres de las especies: ann = *C. annuum*, bac = *C. baccatum*, cam = *C. campylopodium*, car = *C. cardenasii*, cha = *C. chacoense*, chi = *C. chinense*, cor = *C. cornutum*, exi = *C. eximium*, fle = *C. flexuosum*, fri = *C. friburgense*, fru = *C. frutescens*, gal = *C. galapagoense*, lan = *C. lanceolatum*, mir = *C. mirabile*, par = *C. parvifolium*, per = *C. pereirae*, pra = *C. praetermissum*, pub = *C. pubescens*, rec = *C. recurvatum*, rho = *C. rhomboideum*, sch = *C. schottianum*, tov = *C. tovarii*, vil = *C. villosum*

Además, según Moscone *et al.* (2007), la línea de *C. annuum* probablemente dio lugar a la especie endémica *C. galapagoense*, así como a *C. rhomboideum* en el noroeste de

América del Sur. Después de que esta última especie ha colonizado América Central, *C. lanceolatum* podría haber aparecido. Una segunda migración temprana a las regiones del este en las tierras bajas subtropicales de Bolivia pudo haber dado lugar al origen de *C. baccatum* y más tarde al "grupo de flores púrpura" (*C. eximium*, *C. cardenasii*, *C. pubescens* y *C. tovarii*), diferenciada en las regiones secas occidentales de los Andes a elevaciones medias. Además, otra rama de un ancestro común de *C. baccatum*, podría haberse extendido a las zonas subtropicales del este y del sureste para producir *C. praetermissum* y *C. flexuosum*, respectivamente. Por último, el ancestro de esta última especie podría haber mirado hacia el este a las selvas costeras de Brasil para establecer aquí el centro más activo de diversificación en *Capsicum*, con el grupo de  $2n = 26$  de *C. campylopodium*, *C. cornutum*, *C. friburgense*, *C. mirabile*, *C. pereirae*, *C. recurvatum*, *C. schottianum* y *C. villosum*.

La difusión del pimiento en el resto del mundo ocurrió con gran velocidad. A finales del s. XV, principios del XVI, algunas especies eran prácticamente moneda de cambio en algunos sitios de Europa, igual que lo habían sido en América tradicionalmente. Dada su importancia económica, como saborizante, conservante e incluso preventivo contra parásitos intestinales (Blanco y Morales, 1990, Nuez *et al.*, 2003), se financió a Colón la búsqueda de una ruta alternativa hacia el continente asiático, evitando tener que pasar por la que en ese momento era la única ruta, que era controlada por Portugal. En su lugar, se halló lo que para los migrantes europeos era un nuevo continente, lleno de una diversidad tanto cultural como biológica, que pudieron explotar tanto en América, como en Europa, y más tarde incluso África y Asia. En el caso especial del Chile, como sustituto de la pimienta, su difusión fue a tal grado que se consideran actualmente, tanto Asia como Europa, como sitios de domesticación secundaria (Greenleaf, 1986, Andrews, 1995, Namesny, 2006).

#### **1.4 Diversidad de tipos varietales, prioritariamente *C. annuum* y especies afines**

De acuerdo con el autor o región donde se revise, obtendremos una clasificación diferente para identificar los tipos varietales. Por ello, a continuación, se presentan algunas

clasificaciones por país o región, siendo útil en mayor medida solo para su sitio de desarrollo, pues puede variar enormemente de un país a otro.

### Clasificación en Estados Unidos

**Tabla 6.** Clasificación de cultivares de pimiento en EE. UU. (Smith et al., 1987).

Grupo	Descripción de cultivares representativos
I	Frutos grandes, lisos y carnosos: <i>California Wonder</i> , <i>Roumanian hot</i> , <i>Pimiento perfection</i> .
II	Frutos anchos, lisos y poco carnosos: <i>Ancho</i> .
III	Frutos largos y finos: <i>Anaheim</i> , <i>Cayenne</i> , <i>Cubanelle</i> .
IV	Frutos de hasta 7,5 cm de largo, verdes en estado inmaduro, picantes: <i>Jalapeño</i> , <i>Serrano</i> , <i>Santaka</i> .
V	Frutos de hasta 5 cm de largo, globosos, carnosos: <i>Sweet cherry</i> .
VI	Frutos amarillos en estado inmaduro: <i>Caloro</i> , <i>Hungarian Yellow Wax</i> , <i>Sweet Banana</i> , <i>Roumanian sweet</i> .
VII	Frutos delgados, que pasan de amarillo a rojo, 2,5-3,75 cm de longitud, muy picante: <i>Tabasco</i> .

### Clasificación en México

**Tabla 7.** Principales chiles cultivados en México (Laborde y Rendón Poblete, 1989; Pozo et al. 1991).

Tipo	Picor	Clima (zona entre paréntesis)	Uso
<b>A. Consumo nacional y exportación</b>			
<i>Jalapeño</i>	medio /alto	cálido (2b, 4, 1a)	Verde, crudo o en salsas. Verde, encurtido (uso más corriente). Maduro, seco y ahumado (llamado Chilpotle)
<i>Serrano</i>	alto	cálido (2b, 4, 1a)	Verde, crudo o en salsas.
<i>Ancho</i>	medio /alto	templado (4, 1a)	Maduro, seco. Muy popular. Verde, crudo, relleno, en rodajas, es llamado poblano.
<i>Mulato</i>	medio /alto	templado (4)	Igual que el tipo Ancho pero madura en marrón en lugar de rojo.
<i>Pasilla</i>	medio	templado (4)	Maduro, seco. Ampliamente utilizado. Verde, crudo, llamado Chilaca.
<i>De Árbol</i>	muy alto	templado (4)	Maduro, seco. Da un aroma especial a las salsas picantes.
<i>Piquín (fruto alargado),</i>	muy alto	cálido (2a, 2b, 1a, 1b, 3)	Verde, encurtido, seco. Recogido en plantas silvestres, generalmente <i>C. annuum</i> var. <i>aviculare</i> ,

<b>Chiltepín (redondo)</b>			pero también <i>C. frutescens</i> en regiones 1b, 2b y 3. También denominado "chile de los pájaros".
<b>Varios, secos</b>	muy alto	templado y cálido (1 a 4)	Costeño, Cora, Puya, Cascabel, Mirasol, Guajillo, Bola, etc., se consumen sólo secos. Menos importantes que Ancho, Mulato, Pasilla, o De Árbol, desplazan a éstos en algunas especialidades culinarias.
<b>Habanero</b>	muy alto	cálido (3)	Verdes o maduros, crudos. Salsas industriales. El único <i>C. chinense</i> cultivado en México. De introducción posterior a la independencia de España.
<b>Manzano</b>	muy alto	frío (4, sólo por encima de los 2.000 m)	El único <i>C. pubescens</i> comercialmente cultivado en México. Soporta bajas temperaturas que no resisten otros <i>Capsicum</i> . De introducción en el siglo XX.
<b>B. Exclusivamente para exportación</b>			
<b>Bell</b>	no	cálido (1a, 4)	Crudos, ensaladas, consumo local limitado.
<b>Varios</b>	no/alt o	cálido (1a, 4)	Crudos, muy raros en los mercados locales. Cubanelle, Fresno, Caloro, Hungarian, Anaheim.

### Clasificación en la Europa mediterránea occidental

**Tabla 8.** Clasificación de cultivares de fruto grande y dulce (Pochard, 1966, y modificaciones de Nuez et al. 2003).

<b>A</b>	<b>Sección longitudinal cuadrangular</b>	<b>Variedad tipo</b>
A1	Superficie lisa, pedúnculo no hundido, muy carnoso	<i>California Wonder</i>
A2	Pedúnculo hundido, bastante carnoso, lóculos marcados	<i>Quadrato d'Asti</i>
A3	Pedúnculo hundido, medianamente carnoso, superficie asurcada	<i>Carré Doux</i>
A4	Peso menor de 100 g, carne fina	<i>Sverka</i>
<b>B</b>	<b>Sección longitudinal rectangular</b>	<b>Variedad tipo</b>
B1	Relación longitud/anchura inferior a 2	<i>Morro de Vaca</i>
B2	Relación longitud/anchura superior a 2	<i>Dulce de España, Largo de Reus</i>
B3	Tronco cónico, peso aproximado de 100 g	<i>Ruby King</i>
B4	Peso inferior de 100 g	<i>Doux Aurore, Jade</i>
<b>C</b>	<b>Sección longitudinal triangular</b>	<b>Variedad tipo</b>
C1	Muy largo, puntiagudo	<i>Cuerno de Toro</i>
C2	Muy largo, obtuso	<i>Doux d'Alger</i>
C3	Alargamiento medio, hombros anchos	<i>Najerano, Infantes</i>
C4	Fruto corto, frecuentemente erecto	<i>Pico de Mendavia</i>
F	Fruto atomatado	<i>Topepo, Pallagi</i>
N	Fruto subsférico	<i>Ñora</i>
P	Fruto acorazonado	<i>Morron de Conserva</i>

## **1.5 Caracteres de interés en la mejora del pimiento: adaptación a condiciones de bajos insumos**

Dentro del sistema agroproductivo, la interacción en distintos niveles entre el genotipo y el ambiente es quien determina el resultado final, llámese cantidad o calidad (Tiessen, 2012). Entre todos estos factores necesarios para el desarrollo adecuado de la planta, controlados o no por el humano, existen elementos conocidos como factores limitantes, definidos por la Ley de Liebig y la de Shelford. La ausencia, presencia o cantidad de este factor puede definir la producción final. Cabe mencionar que su presencia solo por sí misma no basta, como en el caso de los nutrientes, deben ser biodisponibles, esto es: que se encuentren en la forma química que pueda absorber la planta. P.E. Al fertilizar el suelo con productos de origen animal como fuente de nitrógeno (materia fecal, ureas, etc.), este debe ser degradado a formas amoniacales ( $\text{NH}_4^+$ ), nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) que puedan ser absorbidos por las raíces. Solo hasta que ese proceso ha sido llevado a cabo, el nutriente será biodisponible. Algo similar ocurre con las bacterias nodulares fijadoras de nitrógeno, que toman el nitrógeno del aire ( $\text{N}_2$ ) y lo convierten en formas útiles para la planta (Pereyra, 2001).

Ahora bien, hoy en día sabemos que las plantas pueden contar con mecanismos para ajustar la adquisición de nutrientes en diferentes condiciones, tanto cuando hay alta disponibilidad sin llegar a presentar síntomas de intoxicación como cuando hay muy baja disponibilidad (e.g. sistemas de bajos insumos) sin presentar síntomas de deficiencia, haciendo un uso eficiente de los elementos disponibles. Estos mecanismos dependen directamente de procesos enzimáticos de la planta, por lo tanto, son los genotipos los que definen si pueden o no llevarlos a cabo y la variabilidad dentro de las poblaciones la que provee el grado de tolerancia (Skewes, 2006)

### **1.5.1 Uso eficiente del fósforo**

De acuerdo con García y Picone (2004) es el fósforo (P) el nutriente, después del nitrógeno, que con mayor frecuencia afecta los cultivos. El P es estructural y funcionalmente



importante para enzimas, ácidos nucleicos y proteínas, está involucrado prácticamente en cualquier proceso de adquisición o transferencia de energía. La cantidad neta de P en el suelo está controlada por la roca madre de origen del mismo, así como por el clima. En suelos de cultivo, es el humano quien añade este elemento en forma de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, siendo la roca fosfórica su principal fuente de origen de esta última, fuente no renovable. Las reservas conocidas tienen una vida estimada, en los modelos más pesimistas, de 50 años a este ritmo de extracción, en las más optimistas le dan hasta 300 años.

Además, la adición constante de P por parte del humano ha alterado los ciclos biogeoquímicos naturales. Esta actividad ha incrementado el contenido de P en suelos y aguas (aguas subterráneas, ríos y costas). Esto se debe, por una parte, a la baja eficiencia en el uso del fósforo que, considerando la cadena completa, ronda entre 25-75% perdido en el ambiente. Esto suele contribuir a la eutrofización de aguas, degradación del suelo e incluso con el cambio climático y la pérdida de biodiversidad.

Desde los 1960s, el uso humano de fertilizantes sintéticos fosforados se ha triplicado. Además, se estima un incremento en la demanda entre 40-50% en los próximos 50 años de acuerdo con el crecimiento poblacional esperado y por la tendencia en la dieta que apunta hacia un mayor consumo de productos de origen animal. Estos cambios apuntan a que habrá incrementos en las emisiones en suelos y aguas, exacerbando problemas ambientales actuales, a menos que se lleven a cabo acciones que mejoren la eficiencia en el uso del P (Sutton *et al.*, 2013).

Durante el proceso de mineralización que da origen de las fracciones realmente disponibles para la planta es necesario, por una parte, la presencia y actividad de microorganismos del suelo. Por otro lado, la propia capacidad de la planta para llevar a cabo esta mineralización. Ambos casos son mediados por enzimas conocidas generalmente como fosfatasas.

### **1.5.2 Defensa contra el estrés oxidativo**

Una consecuencia inevitable del metabolismo aerobio es la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS, por sus siglas en inglés). Las ROS son moléculas que incluyen tanto radicales libres, como no radicales. Entre estas últimas se encuentra el peróxido de

hidrogeno ( $H_2O_2$ ). Los diferentes estreses ambientales, como la sequía, salinidad, heladas, toxicidad por metales y radiación UV-B y otros estreses con origen en el suelo, así como el ataque de patógenos llevan una producción incrementada de ROS debido a la disrupción de la homeostasis celular. Todos los ROS son extremadamente dañinos para los organismos en altas concentraciones. Cuando el nivel de ROS excede los mecanismos de defensa, se dice que está sufriendo estrés oxidativo. La producción incrementada de ROS por estrés ambiental puede convertirse en una amenaza para las células, causando diferentes efectos, como la peroxidación de lípidos, oxidación de proteínas, daño a ácidos nucleicos, inhibición de enzimas, activación de rutas involucradas con la muerte celular programada e incluso, la muerte celular (Sharma *et al.*, 2012).

A pesar de su actividad destructiva, los ROS están bastante estudiados como mensajeros secundarios en una variedad de procesos celulares, incluyendo tolerancia a estreses ambientales. Que actúen los ROS como molécula de señalización o dañina depende del delicado equilibrio entre su propia producción y su degradación. Debido a los múltiples roles de las ROS, es necesario para las células tener un control estricto del nivel de ROS para evitar cualquier lesión oxidativa y tampoco eliminarlos por completo. La degradación o detoxificación de ROS excesivas es conseguida por un sistema antioxidativo eficiente que comprende tanto antioxidantes no enzimáticos, como enzimáticos. Entre los primeros encontramos el ascorbato (AsA), glutatión (GSH), carotenoides, tocoferoles, fenoles y otros. Entre los segundos están diferentes enzimas como la superóxido dismutasa (SOD), catalasa (CAT), guaiacol peroxidasa (GPX) y otras más (*ibid.*).

## **1.6 Generalidades del cultivo ecológico**

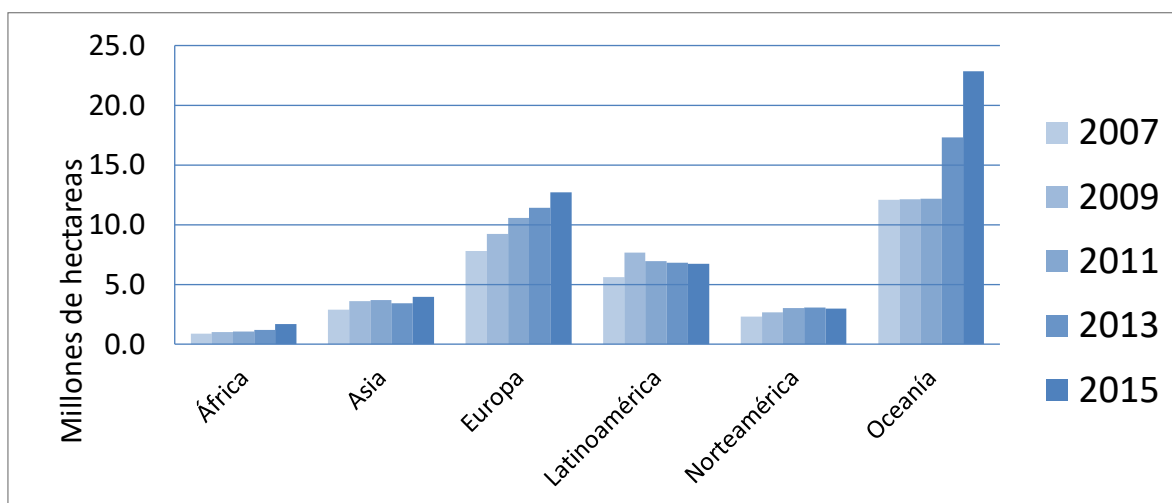
De acuerdo con el Codex Alimentarius, realizado por la Comisión del Codex Alimentarius (1999), organismo subsidiario de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS), la agricultura orgánica “es un sistema holístico de gestión de la producción que fomenta y mejora la salud del agroecosistema, y en particular la biodiversidad, los ciclos biológicos, y la actividad biológica del suelo. Hace hincapié en el empleo de prácticas de gestión

prefiriéndolas respecto al empleo de insumos externos a la finca, teniendo en cuenta que las condiciones regionales requerirán sistemas adaptados localmente. Esto se consigue empleando, siempre que sea posible, métodos culturales, biológicos y mecánicos, en contraposición al uso de materiales sintéticos, para cumplir cada función específica dentro del sistema”.

De unos años a la fecha, la agricultura orgánica (u ecológica) ha ido adquiriendo mayor importancia entre los consumidores y productores. Esto como consecuencia del reconocimiento del impacto de las actividades humanas sobre el medio, en particular las prácticas agrícolas, que merman la calidad del suelo, recurso crucial para el desarrollo de cualquier país, generando la salinización y desertificación, así como la eutrofización de los diferentes embalses o fuentes del recurso hídrico (Brodt *et al.*, 2011, Chislock *et al.*, 2013)

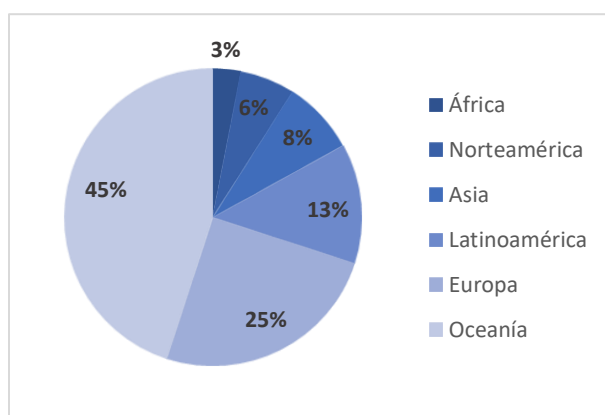
### 1.6.1 Mercado del cultivo ecológico

Parte de esta nueva conciencia sobre la producción de productos agrícolas, se puede observar en la clara tendencia a nivel mundial. En Europa se ha pasado de 6,8 millones de hectáreas en 2005 a 11,2 millones de hectáreas en 2012 (10 millones de hectáreas en la UE), con más de 320.000 explotaciones (más de 250.000 en la UE) (Figura 10), con tendencia al alza.

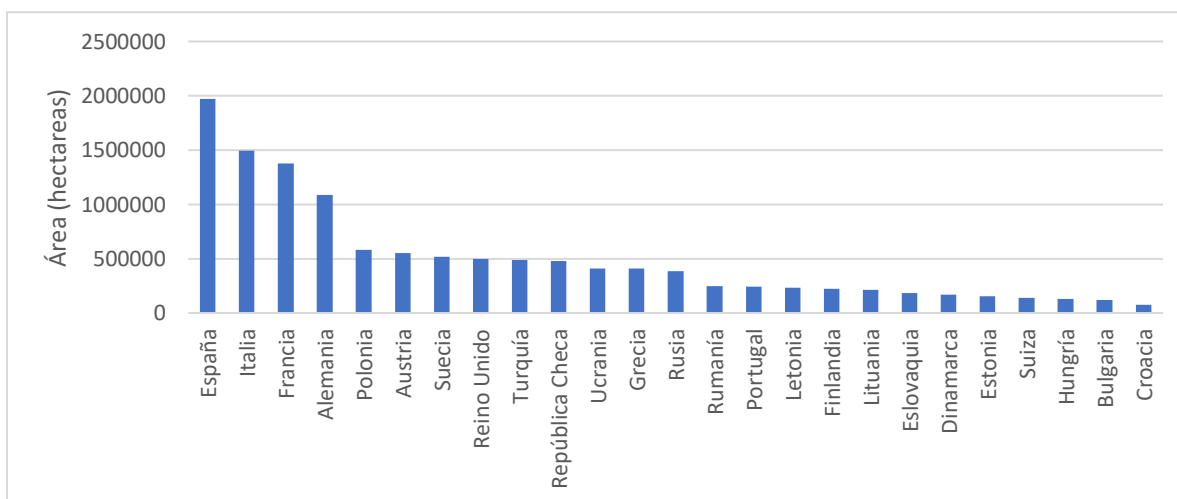


**Figura 10.** Crecimiento del área destinada para agricultura ecológica por continente 2007-2015 (FiBL-IFOAM survey 2009-2017)

Este crecimiento tiene cabida debido al apoyo que se ha brindado al sector, tanto por parte del consumidor consciente del impacto de esta actividad, como del Estado. El 2,3% del área cultivada europea es ecológica (5,7% en la UE, 2014). En este sentido, el 25% de la superficie ecológica del mundo se localiza en Europa (Figura 11), siendo España, Italia, Francia y Alemania los países con la mayor superficie (Figura 12). Aunque es importante considerar su tamaño en comparación al resto de países, existen siete países en Europa con más del 10% del área de cultivo destinada a la producción ecológica: Liechtenstein, Austria, Suecia, Estonia, Suiza, Letonia y la República Checa. De acuerdo con FiBL (2017), Europa alcanzó en 2015 por ventas relacionadas con el sector agroecológico de 29,8 mil millones de euros (27,1 mil millones de euros en la UE).



**Figura 11.** Distribución del área utilizada para agricultura ecológica por región (FiBL, 2016)



**Figura 12.** Principales países europeos por área destinada para agricultura ecológica [ha] (FiBL, 2015)

## 1.6.2 Características del cultivo ecológico

De acuerdo con la Comisión del Codex Alimentarius la agricultura ecológica (u orgánica) "es un sistema global de gestión de la producción que fomenta y realza la salud de los agroecosistemas, inclusive la diversidad biológica, los ciclos biológicos y la actividad biológica del suelo. Hace hincapié en la utilización de prácticas de gestión, con preferencia a la utilización de insumos no agrícolas (...) Esto se consigue aplicando, siempre que es posible, métodos agronómicos, biológicos y mecánicos, en contraposición a la utilización de materiales sintéticos, para desempeñar cualquier función específica dentro del sistema".

De acuerdo con la FAO, el objetivo principal de la agricultura orgánica es optimizar la salud y la productividad de las comunidades interdependientes del suelo, las plantas, los animales y las personas. Dentro de estas relaciones interdependientes es donde se soporta el sistema productivo, junto con el aspecto social y ambiental que también impactan en ellas.

Para disminuir el impacto de estos sistemas, se plantean una serie de principios a seguir (IFOAM. Principles of Organic Agriculture):

Salud: la agricultura orgánica debe sostener y promover la salud del suelo, de la planta, del animal, de la persona y del planeta como únicos e indivisibles.

Ecología: la agricultura orgánica debe basarse en ciclos y sistemas ecológicos vivos, trabajar con ellos, emularlos y ayudar a sostenerlos.

Equidad: la agricultura orgánica debe basarse en relaciones que garanticen la equidad con respecto al ambiente común y las oportunidades de vida.

Cuidado: la agricultura orgánica debe ser manejada de manera responsable y con precaución para proteger la salud y el bienestar de las generaciones presentes y futuras y del medio ambiente.

Teniendo en cuenta estos principios, se pueden establecer las buenas prácticas agrícolas (Bot y Benites, 2005):

- Asentarse en fincas después de un período de conversión, cuya duración será determinada por factores específicos de cada sitio, tales como la historia del terreno y el sistema de producción utilizado.

- Mejorar la diversidad biológica del sistema.
- Aumentar la actividad biológica del suelo.
- Mantener la fertilidad del suelo en el largo plazo.
- Reciclar los desechos animales o vegetales para devolver nutrientes al sistema, minimizando el uso de fuentes no renovables.
- Utilizar recursos renovables en sistemas agrícolas organizados localmente.
- Promover el uso saludable del agua, el suelo y el aire, así como minimizar todas las formas de contaminación que puedan resultar de la producción agrícola.
- Manejar productos agrícolas durante el procesamiento con cuidado de no perder la integridad orgánica en el proceso.
- Evitar el uso de insumos químicos sintéticos.
- Supervisar la producción.

Todas estas dirigidas a mejorar la relación entre el humano con el medio anteponiendo el respeto a la vida y asumiendo la responsabilidad ante los efectos causados.

En el dado caso de la presencia de plagas realmente severas, se pueden llegar a aplicar fitosanitarios, pero de acuerdo con las pautas que marca el artículo 12, apartado *h*, del Reglamento (CE) No 834/2007 sobre producción y etiquetado de los productos ecológicos y por el que se deroga el Reglamento (CEE) no 2092/91. Estos son:

*h) en caso de que se haya constatado la existencia de una amenaza para una cosecha, solo podrán utilizarse productos fitosanitarios que hayan sido autorizados para su utilización en la producción ecológica de conformidad con el artículo 16;*

Artículo 16:

*1. La Comisión, de acuerdo con el procedimiento a que se refiere el artículo 37, apartado 2, autorizará para su utilización en la producción ecológica y los incluirá en una lista restringida, los productos y sustancias que pueden utilizarse en la agricultura ecológica para los cometidos siguientes:*

*a) como productos fitosanitarios;*

- 
- 
-

*2. La autorización de los productos y sustancias a que se refiere el apartado 1 estará supeditada a los objetivos y principios establecidos en el título II y a los siguientes criterios generales y específicos, que se evaluarán en su conjunto:*

*.  
.  
.*

*c) en el caso de los productos mencionados en el apartado 1, letra a), serán de aplicación las siguientes disposiciones:*

*i) su empleo deberá ser esencial para el control de un organismo dañino o de una determinada enfermedad para los cuales no se disponga de otras alternativas biológicas, físicas o de selección, u otras prácticas de cultivo u otras prácticas de gestión eficaces,*

*ii) si los productos no son de origen vegetal, animal, microbiano o mineral y no son idénticos a los que se dan en la naturaleza, solo podrán ser autorizados si sus condiciones de uso impiden todo contacto directo con las partes comestibles del cultivo;*

Todas estas medidas son aplicadas con el fin tanto de alcanzar la producción de alimentos de calidad, pero también cuidando que el fin no sea más importante que los medios para alcanzarlo pasando por encima de los diferentes integrantes del agroecosistema, como desgraciadamente se hizo y sigue realizándose en sistemas tradicionales industrializados de producción.

## **1.7 Importancia de la fertilidad del suelo dentro del cultivo ecológico**

La fertilidad del suelo es la capacidad de este para sustentar la vida vegetal, la que a su vez depende de la disponibilidad de nutrientes para las plantas, de la capacidad de retención de agua, de la existencia de un espacio físico para el crecimiento de raíces y movimientos de gases, y de la ausencia de procesos de destrucción. Por esto, es necesario considerar que sobre la fertilidad del suelo intervienen en forma interdependiente factores químicos, físico y biológicos (Céspedes, 2005).

Dentro de la filosofía de la agricultura ecológica, el contribuir a incrementar la fertilidad del suelo es uno de los principales objetivos. Por tanto, el manejo de la fertilidad del suelo es un aspecto fundamental que considerar en un sistema de producción orgánica. A diferencia de la producción convencional, éste no intenta suplir los requerimientos de nutrientes del cultivo con fertilizantes solubles, sino que pretende construir fertilidad y mantenerla a largo plazo, porque la aplicación de fertilizantes altamente solubles reduce la actividad de los microorganismos del suelo. Por lo tanto, es necesario buscar otras alternativas que, además de reponer los nutrientes utilizados por los cultivos, permitan incrementar las características físicas y la actividad biológica en el suelo. La base del manejo de la fertilidad del suelo en sistemas ecológicos consiste en incorporar importantes cantidades de materia orgánica, mediante la aplicación de materiales de origen animal o vegetal, que en lo posible deben ser residuos del sistema productivo y que permiten mejorar las características del suelo, al mismo tiempo que suprimir problemas sanitarios y reciclar los residuos de la producción.

Aunque ya se mencionaron algunas de las buenas prácticas en el cultivo ecológico en el apartado anterior, en particular para el buen manejo del suelo y su fertilidad, hay que mencionar algunas más (Céspedes, 2017):

- Incorporar materia orgánica, de preferencia estabilizada, ya que en el proceso mueren patógenos y semillas de malezas y tienen un efecto de más largo plazo en el suelo.
- Sincronizar los cultivos en rotación, así evitar dejar el suelo descubierto por periodos prolongados, para evitar volatilización o lixiviación de nutrientes.
- Reducir la labranza del suelo, que causa mineralización de la materia orgánica y destruye la agregación. Favorecer la labranza vertical.
- Incorporar leguminosas en la rotación y como cultivos asociados, ya que aportan nitrógeno, gracias a su asociación con bacterias fijadoras de nitrógeno.
- Utilizar cubiertas de suelo (vivas o muertas) entre hileras de cultivos perennes que evitan pérdida de nutrientes y erosión, reducen fluctuaciones de temperatura y humedad, permiten manejar las malezas y aportan nutrientes.
- Realizar prácticas de conservación de suelos, especialmente en suelos con pendiente.



- Eliminar las quemadas, aprovechar todos los residuos orgánicos.
- Realizar diagnóstico nutricional oportuno y corregir deficiencias usando fertilizantes de baja solubilidad.
- No usar compuestos tóxicos.

### **1.7.1 Determinación de la fertilidad del suelo**

La fertilidad, como ya hemos visto, no es una característica que pueda ser simplemente evaluada con un solo parámetro, por ello es necesario analizar la calidad y la salud, para posteriormente integrarlos y hacer un análisis más amplio de la situación total sobre la fertilidad de un suelo dado, o también elegir factores específicos, así poder evaluarlos a lo largo del tiempo, en diferentes condiciones y su evolución (Montejo *et al.*, 2012).

Para medir la calidad, se considera qué tan adecuadas son sus propiedades físicas y químicas para permitir el intercambio de gases, la retención de humedad y de nutrientes, la penetración de raíces, entre otros.

Por su parte, para medir la salud del suelo se toma en cuenta la eficiencia de procesos como los ciclos de nutrientes y los flujos de energía. En este contexto, uno de los indicadores que se ha utilizado es la magnitud de la actividad de diferentes enzimas involucradas en los procesos mencionados con anterioridad.

Las enzimas son moléculas de naturaleza proteínica producidas por los seres vivos y que se encargan de acelerar reacciones químicas o hacer posibles aquellas reacciones que de otra manera no se producirían. Dicho de otro modo, son catalizadores biológicos que, al reducir la energía de activación necesaria para las reacciones, transforman las sustancias involucradas en el metabolismo celular. La mayoría de las enzimas actúan dentro de las células, pero algunas son extracelulares.

En agricultura, la actividad enzimática y otros indicadores biológicos, como la biomasa microbiana, se emplean como una medida de la fertilidad y del impacto de esta actividad en los suelos (García-Ruíz *et al.*, 2008).

La liberación de enzimas es un proceso constante, dicha liberación puede ocurrir por secreción o por lisis celular cuando los organismos mueren. De las enzimas liberadas, solo un pequeño porcentaje se encuentra estabilizado, lo cual permite que estas enzimas puedan

soportar procesos que naturalmente ocurren en el suelo, como la desnaturalización abiótica, la adsorción, la inactivación o degradación por proteasas (Montejo *et al.*, 2012).

#### **1.7.1.1 Fosfatasa alcalina. Mineralización del fósforo orgánico**

Como las plantas utilizan solo fósforo inorgánico, los compuestos orgánicos fosforados deben ser primero hidrolizados por fosfatasas, las cuales se originan en su mayoría en las raíces de las plantas, hongos y microorganismos del suelo. Las fosfatasas medidas en el suelo reflejan la actividad de enzimas unidas a coloides del suelo y fosfatasas asociadas con plantas vivas y muertas o células de microbios. Las enzimas fosfatasas pueden ser un buen indicador de la mineralización potencial del fósforo orgánico y la actividad biológica del suelo. La actividad de la fosfatasa está relacionada con las condiciones del suelo, de la vegetación, responde a cambios en el manejo del cultivo y puede estar relacionada con los cambios estacionales en la temperatura y humedad del suelo (Krammer y Green, 2000). El nombre genérico de “fosfatasa” ha sido usado para describir un amplio grupo de enzimas que catalizan la hidrólisis de ésteres y anhídridos de ácido fosfórico. El Comité de Nomenclatura de la Unión Internacional de Bioquímica y Biología Molecular, ha clasificado todas estas enzimas en cinco grupos mayores, en particular para nuestro caso nos interesa el grupo de las hidrolasas monoéster fosfóricas o fosfomonoesterasas, dentro del cual está el grupo de las fosfatasas alcalinas (Nannipieri *et al.*, 2011).

Entre las diversas posibilidades para evaluar las fosfatasas encontramos varias, pero la más útil fue la establecida para medir las fosfatasas alcalinas quienes, mediante la metodología de Tabatabai y Bremner (1969), pueden ayudarnos a evaluar la capacidad de mineralización del fósforo.

#### **1.7.1.2 Catalasa. Reducción del peróxido, agentes oxidantes y fauna microbiana**

Entre las enzimas antioxidantes, la catalasa (CAT) fue la primera enzima en ser descubierta y caracterizada. Es una enzima ubicua tetramérica con cuatro grupos hemo que cataliza la dismutación de dos moléculas de  $H_2O_2$  en agua y oxígeno. Los peroxisomas son los sitios de mayor producción de  $H_2O_2$ . CAT degrada el  $H_2O_2$  generado en este organelo

durante la oxidación fotorespiratoria, la B-oxidación de los ácidos grasos y otros sistemas de enzimas. Aunque existen reportes frecuentes de CAT estando presente en el citosol, cloroplastos y mitocondrias, la actividad de CAT no está bien esclarecida ahí. A la fecha, todas las especies de angiospermas estudiadas, contienen tres genes CAT. (Sharma *et al.*, 2012)

El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ha sido implicado en muchas condiciones de estrés. Cuando las células están estresadas por energía y están generando rápidamente H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a través de procesos catabólicos, el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> es degradado por CAT de una manera eficiente. Estreses ambientales causan también incremento o reducción de la actividad de CAT, dependiendo de la intensidad, duración y tipo de estrés. Estudios de estrés revelaron que plantas deficientes de CAT tenían una susceptibilidad incrementada al paraquat, sal y ozono, pero no a las heladas. Mediante experimentos de transformación se ha demostrado que tiene un papel crucial en el mantenimiento del balance redox durante condiciones de estrés oxidativo, por ejemplo, cuando este estrés es inducido por metales pesados como el cadmio (Cd) (*ibid.*).

## 2. OBJETIVOS

Los objetivos de la presente investigación fueron establecidos ante la clara demanda productiva de hortalizas en sistemas agroecológicos, donde existe un vacío en el desarrollo de variedades adaptadas a estas condiciones. En concreto, se ha trabajado en términos de interacción raíz-suelo, mediante una evaluación comparativa de numerosos genotipos de chiles (*Capsicum spp.*) en sistemas ecológico y convencional. En concreto los principales objetivos han sido:

- Estudiar los efectos del sistema de cultivo, genotipo, condiciones del muestreo del cultivo e interacción genotipo×sistema de cultivo en el nivel de expresión de las actividades de las enzimas, catalasa y fosfatasa alcalina.
- Estudiar en detalle el efecto de la interacción genotipo×sistema de cultivo con objeto de identificar aquellas accesiones con mejor respuesta radicular bajo las condiciones del cultivo ecológico y, alternativamente, aquellas que muestren estabilidad en ambos sistemas de cultivo.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 Material vegetal

Para este trabajo se ha evaluado una colección de 24 accesiones pertenecientes a la especie *C. annuum* y afines. Esta colección abarcó fundamentalmente variedades locales españolas de pimiento:

**Tabla 9.** *Accesiones utilizadas, identificador, nombre local, nombre científico y procedencia.*

<b>Nombre Variedad</b>	<b>Nombre científico</b>	<b>Origen, Región/Estado</b>
<i>Ancho mulato</i>	<i>C. annuum</i>	México
<i>Chile de árbol</i>	<i>C. annuum</i>	México
<i>Chile serrano</i>	<i>C. annuum</i>	México
<i>Cuneo giallo</i>	<i>C. annuum</i>	Franci, Semenci, Italia
<i>Di senise</i>	<i>C. annuum</i>	Italia
<i>Doux long</i>	<i>C. annuum</i>	Francia
<i>Espelette</i>	<i>C. annuum</i>	Francia
<i>Guindilla Ibarra</i>	<i>C. annuum</i>	País Vasco, España
<i>Numex Big Jim</i>	<i>C. annuum</i>	P. W. Bosland, Nuevo México, EE. UU.
<i>Numex conquistador</i>	<i>C. annuum</i>	México
<i>Pasilla Bajío</i>	<i>C. annuum</i>	México
<i>Pimiento de Arnoia</i>	<i>C. annuum</i>	C. Inv. Agr. Mabegondo, La Coruña, Galicia, España
<i>Pimiento de Bola</i>	<i>C. annuum</i>	DOP Pimentón de Murcia, Murcia, España
<i>Pimiento de Padrón</i>	<i>C. annuum</i>	Galicia, España
<i>Pimiento del Bierzo</i>	<i>C. annuum</i>	IGP Pimiento Asado del Bierzo, Castilla y León, España
<i>Pimiento Gernika cv. "Derio"</i>	<i>C. annuum</i>	NEIKER. Bilbao, Euskadi, España
<i>Pimiento najerano</i>	<i>C. annuum</i>	Semillas Ramiro Arnedo, La Rioja, España
<i>Pimiento palmero</i>	<i>C. annuum</i>	La Palma, Canarias, España
<i>Piquillo de Lodosa</i>	<i>C. annuum</i>	Navarra, España
<i>Ají dulce</i>	<i>C. chinense</i>	-
<i>ECU-994</i>	<i>C. chinense</i>	Ecuador
<i>BOL-144</i>	<i>C. frutescens</i>	-
<i>BOL-37</i>	<i>C. baccatum</i> var. <i>pendulum</i>	Bolivia
<i>BOL-58</i>	<i>C. baccatum</i> var. <i>pendulum</i>	Bolivia

## 3.2 Condiciones de cultivo

### 3.2.1 Cultivo ecológico

Datos de identificación del sitio: Polígono: 78; Parcela: 53; Coordenadas UTM: X: 734494,88, Y: 4390434,86. Sagunto, Valencia (Figura 13).

El terreno se preparó mecánicamente, con rotovator. Tiene un historial de rotaciones cada 4 años. Estercolado base con estiércol principalmente de oveja y a veces de caballo en dosis de 4 kg/m<sup>2</sup>. Sin aplicaciones de plaguicidas, el control fue mediante coccinélidos y crisópidos, desbrozado manual mensualmente durante el ciclo de cultivo y tres aplicaciones térmicas por ciclo de cultivo. Riego por inundación a partir de agua de pozo de la Comunidad de regantes privada “La Providencia”, realizando 2 inmediatos a principio del cultivo (trasplante) y cada 8-10 días el resto del cultivo, dependiendo de las condiciones ambientales.



*Figura 13. Localización de la parcela con manejo ecológico*

### 3.2.2 Cultivo convencional

Datos de identificación del sitio: Polígono: 79; Parcela: 33; Coordenadas UTM: X: 732911,94, Y: 391747,42. Sagunto, Valencia (Figura 14).



El terreno se preparó mecánicamente, con rotovator. Fue fertilizado el campo con triple 15 (15% de nitrógeno, 15% de fósforo y 15% de potasio), nitrato cálcico (al 27%) y quelato de hierro (varias aplicaciones vertidas en el agua). Como plaguicidas fueron utilizados oxiclورو de cobre (fungicida, al 25%, 100 cc cada 50 litros de agua), clorpirifos (insecticida, al 48%, 50 cc cada 25 litros de agua) y metil-clorpirifos (insecticida acaricida, al 22,4 %, 30cc cada 25 litros de agua). Además, se usó granulado para caracoles (babosas) y escardas para las malas hierbas.

Los riegos, previo a la etapa reproductiva, podían prolongarse los riegos hasta los 10 o 12 días para forzar el enraizamiento y floración. Entrada la etapa reproductiva fueron cada 8 días.

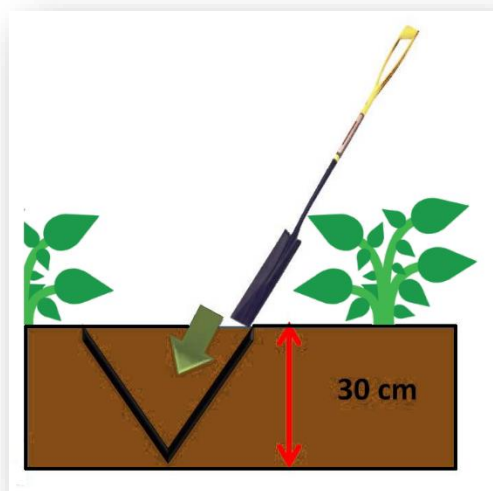


*Figura 14. Localización de la parcela con manejo convencional*

### **3.3 Muestreo**

Se realizaron cuatro tipos de muestreos por sistema de cultivo. El primero que corresponde al momento previo al trasplante (mismo día), llamado “inicio del cultivo”, fue el 13 de mayo del año 2015, en el cual se tomaron 5 muestras aleatorias a no más de 30 cm de profundidad al azar de aproximadamente 1 litro, retirando la capa superior más suelta de tierra. Al momento del trasplante las plántulas contaban con 5-6 hojas verdaderas. Se realizó la plantación, con 1 m entre filas y 0,5 m entre plántulas de la misma fila. El segundo

muestreo, realizado al inicio de la temporada de cosecha de fruto en madurez comercial para verde, llamado “mitad del cultivo”, se tomó entre plantas de la misma accesión aproximadamente 100 días después del trasplante (DDT), a principios de agosto del año 2015. Las tomas a la mitad del cultivo se realizaron entre plantas del mismo bloque, tomando una muestra de suelo del fondo, a 20-30 cm de profundidad (Figura 15). El tercer muestreo, realizado al final del cultivo, se tomó aproximadamente a los 180 DDT, a finales de octubre del año 2015 coincidiendo con la última cosecha. Este fue llamado “final de cultivo”. Se realizó procurando llevarlo a cabo en el mismo sitio donde había sido tomado el anterior. El cuarto y último muestreo, realizado a nivel de rizosfera, se llevó a cabo aproximadamente a los 190 DDT, a principios de noviembre coincidiendo con el final del ciclo de cultivo para el levantamiento del campo. En este, se tomaron muestras directamente a nivel de raíces. Para esto, se extrajo la raíz del suelo con cuidado de no dañarla y tomando muestras de suelo donde estuviera en contacto directo con ellas. Todas las muestras fueron refrigeradas entre 4-5°C por cuatro meses, con objeto de conservarlas antes de realizar su análisis.



*Figura 15. Toma de muestra de suelo entre plantas*

### **3.4 Diseño experimental y análisis estadístico de los resultados**

El modelo de distribución fue al azar. Cada variedad en cada parcela (en ambos sistemas de cultivo) estaba representada por ocho plantas distribuidas en dos bloques de

cuatro plantas repartidos aleatoriamente. De esta manera, se buscaba atenuar el efecto posición en cada parcela experimental y se sometía cada variedad a una distorsión ambiental generalizada distribuyendo de forma aleatoria el efecto posición. Adicionalmente, se dispuso una fila de bordura con las plantas sobrantes del trasplante. Para realizar los análisis estadísticos (ANOVAs y pruebas de rango múltiple por LSD) se utilizó el software Statgraphics Centurion XVI Versión 16.2.04 (64-bits).

### 3.5 Análisis de actividad enzimática en suelo

Se evaluó la actividad de dos enzimas, la fosfatasa alcalina usando la metodología de Tabatabai y Bermer (1969) y la catalasa, usando la metodología modificada de determinación de Johnson y Temple (1964) y medida del H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> residual mediante permanganometría (García *et al.*, 2003).

#### 3.5.1 Actividad de la Fosfatasa alcalina

De cada muestra, se pesó 0,5 g de suelo, sin materia orgánica visible ni rocas. Se añadió 0,2 ml de tolueno, 4 ml de tampón MUB pH 11 y 1 ml de p-nitrofenil fosfato disódico a 0.025 M e incubó a 37°C por 1 hora. Se detuvo la reacción enzimática añadiendo 1 ml de cloruro de calcio (CaCl<sub>2</sub>) y 4 ml de hidróxido de sodio (NaOH), ambos a 0,5 molar y posteriormente fue filtrado. Se realizó la evaluación de p-nitrofenol obtenido mediante espectrometría. Para cada sesión de análisis se obtuvo una recta de calibración, la longitud de onda utilizada fue 400 nm con el estándar de p-nitrofenol a 10 ppm. Se evaluó en la misma longitud de onda las muestras. Al realizar la conversión de las lecturas a unidades correspondientes, µmoles de p-nitrofenol liberado por gramo por hora (µmol/g·h), se utilizó la siguiente fórmula:

$$AE = \frac{C \times V}{Pm \times G \times T}$$

Donde:

AE.- Actividad fosfomonoesterasa ( $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ ).

C.- Cantidad de p-nitrofenol de la muestra.

V.- Factor de dilución.

Pm.- Peso molecular del p-nitrofenol.

G.- Factor relativo al peso de suelo usado.

T.- Factor relativo al tiempo de incubación.

### 3.5.2 Actividad de la Catalasa

De cada muestra, se pesó 0,5 g de suelo, sin materia orgánica visible ni rocas. Se disolvió la muestra en agitador rotatorio, por media hora a 200-225 rpm en matraz con 40 ml de agua destilada. Se añadió 5 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 1:100, por 10 minutos a la misma velocidad. Se detuvo la reacción enzimática añadiendo 5 ml de ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) al 1,5 M y fue filtrado. Se llevó a cabo la determinación del  $\text{H}_2\text{O}_2$  restante con permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) a 0,005 N, con alícuotas de 25 ml del extracto filtrado. El punto final de la valoración lo señala la aparición del primer color rosado permanente. Para obtener el valor para blanco se obtuvo una alícuota de 25 ml de la disolución hecha con 40 ml de agua destilada, 5 ml de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 1:100, 5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  al 1,5 M y filtrada. Al realizar la conversión de las lecturas a unidades correspondientes, mmoles de  $\text{H}_2\text{O}_2$  consumidos por gramo por hora ( $\text{mmol/g}\cdot\text{h}$ ), se utilizó la siguiente fórmula:

$$AE = \frac{(BG - S) \times N \times 0,5 \times V \times T}{G}$$

Donde:

AE.- Actividad catalasa ( $\text{mmol/g}\cdot\text{h}$ ).

BG.- Cantidad de  $\text{KMnO}_4$  (en ml) gastados en valoración de blanco.

S.- Cantidad de  $\text{KMnO}_4$  (en ml) gastados en valorar las muestras.

N.- Normalidad exacta del  $\text{KMnO}_4$

0,5.- Valor constante que procede del cálculo para conocer los mg de  $\text{H}_2\text{O}_2$  que reaccionan con el  $\text{KMnO}_4$  y del cálculo para obtener la cantidad de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en mmoles.

V.- Factor de dilución.

T.- Factor de tiempo.

G.- Factor relativo a la cantidad de suelo.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## **4.1 Análisis de la varianza (ANOVA) en la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina y la catalasa**

El ANOVA general de la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina reveló diferencias significativas en los diferentes muestreos para los tres factores evaluados, a excepción de accesión para el final del cultivo y la rizosfera y de la interacción sistema de cultivo×accesión para mitad del cultivo (Tabla 10).

En la mitad del cultivo, el factor significativo con mayor peso fue el sistema de cultivo, con un cuadrado medio muy superior al resto. En segundo lugar, tenemos a la accesión, que ha mostrado que existe una contribución significativa también, pero con un peso mucho menor. A nivel de interacción (cultivo×accesión) no se presentan diferencias significativas. Al final del cultivo y a nivel de rizosfera, el factor significativo con mayor peso fue, nuevamente, el sistema de cultivo, con un cuadrado medio muy superior al resto. En segundo lugar, tenemos ahora a la interacción, con una contribución significativa a la variabilidad observada de acuerdo con sus valores en los cuadrados medios. A nivel accesión no se presentaron diferencias significativas.

Estos datos muestran cambios en la contribución de los factores para la actividad fosfatasa en función de la condición de muestreo del cultivo, pudiendo atribuirse a que algunas accesiones están respondiendo de forma positiva a alguno de los sistemas de cultivo, mientras otras pueden ser estables en ambos sistemas. Además, cabe resaltar que, al ser el sistema de cultivo el factor con mayor peso sobre la variación del carácter, este puede estar sesgando el efecto de la accesión y la interacción de ambos, haciendo que aparezcan como menos significativos o no significativos.

Para resolver esta cuestión, se realizaron análisis de la varianza por separado para cada sistema de cultivo, ecológico y convencional (Tabla 11).

En los ANOVAs específicos para sistema y condición de muestreo del cultivo, no se presentaron diferencias significativas a la mitad o al final del cultivo, solo a nivel de rizosfera. En este último, hubo diferencias significativas en ambos sistemas de cultivo. Al observar los

valores de los cuadrados medios, tanto en estos análisis, como en los generales, se hace más claro que la magnitud de la variabilidad dentro de las accesiones estaba enmascarando las diferencias entre ellas. Para poder discernir estas diferencias, se analizaron las medias por medio de pruebas de rangos múltiples con diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher (95%), los resultados se detallan en el siguiente apartado (Tabla 14).

En el caso del ANOVA general de la actividad enzimática de la catalasa reveló diferencias significativas en los diferentes muestreos para los tres factores evaluados, a excepción del factor accesión para la mitad y final del cultivo (Tabla 12).

Tanto en la mitad, como al final del cultivo, el factor significativo con mayor peso fue el sistema de cultivo, con un cuadrado medio muy superior al resto. En segundo lugar, tenemos a la interacción, que ha mostrado que existe una contribución significativa también, pero con un peso mucho menor. A nivel de accesión no se presentan diferencias significativas en ambos sistemas. A nivel de rizosfera, los tres factores presentaron diferencias significativas. El factor significativo con mayor peso fue, nuevamente, el sistema de cultivo, con un cuadrado medio superior al resto. En segundo lugar, tenemos ahora a la accesión y en tercero a la interacción, ambos factores con una contribución significativa a la variabilidad observada de acuerdo con sus valores en los cuadrados medios.

Estos datos muestran cambios en la contribución del factor accesión para la actividad catalasa en función de la condición de muestreo del cultivo, pudiendo deberse a que algunas accesiones están respondiendo de forma positiva e, incluso, interactuando con alguno de los sistemas de cultivo, mientras que otras pueden ser estables en ambos sistemas. Además, cabe resaltar que, al ser el sistema de cultivo el factor con mayor peso sobre la variación del carácter esté sesgando el efecto de la accesión, haciendo que apareciera como no significativo en la mitad y al final del cultivo.

Del mismo modo que para la fosfatasa, se realizaron análisis de la varianza por separado para cada sistema de cultivo, ecológico y convencional (Tabla 13).

En los ANOVAs específicos para sistema y condición de muestreo del cultivo, si se presentaron diferencias significativas a la mitad, al final del cultivo y a nivel de rizosfera en ambos sistemas de cultivo. Ahora bien, para poder discernir entre las accesiones



significativamente diferentes con buena respuesta a cada sistema de cultivo, se analizaron las medias por medio de pruebas de Rangos Múltiples con diferencias mínimas significativas (LSD) de Fisher (95%), los resultados se detallan en el apartado 4.3 (Tabla 15).

**Tabla 10.** ANOVAs multifactoriales generales de la actividad enzimática de la fosfatasa a mitad y final de cultivo y en la zona de la rizosfera.

Factor	MITAD DEL CULTIVO		FINAL DEL CULTIVO		RIZOSFERA	
	g.l. <sup>1</sup>	C. M. <sup>2</sup>	g.l.	C. M.	g.l.	C. M.
<b>A:Cultivo</b>	1	311838***	1	2222***	1	11301***
<b>B:Accesión</b>	23	3246*	23	204 <sub>NS</sub>	23	191 <sub>NS</sub>
<b>A×B</b>	23	1654 <sub>NS</sub>	23	235*	23	609***
<b>Residuos</b>	135	1880	144	139	224	126

<sup>1</sup>grados de libertad; <sup>2</sup>cuadrado medio

NS, \* y \*\*\* indican no significativo para una probabilidad  $p < 0.05$  y significativo para  $p < 0.05$  y  $0.001$ , respectivamente.

**Tabla 11.** ANOVAs de la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina, específicos para sistema y condiciones de muestreo del cultivo.

Factor	Ecológico		Convencional	
	g.l. <sup>1</sup>	C. M. <sup>2</sup>	g.l.	C. M.
<b>MITAD DEL CULTIVO</b>				
<b>Accesiones</b>	23	2341 <sub>NS</sub>	23	2560 <sub>NS</sub>
<b>Residual</b>	65	1954 <sub>NS</sub>	70	1811 <sub>NS</sub>
<b>FINAL DEL CULTIVO</b>				
<b>Accesiones</b>	23	158 <sub>NS</sub>	23	282 <sub>NS</sub>
<b>Residual</b>	65	94 <sub>NS</sub>	79	176 <sub>NS</sub>
<b>RIZOSFERA</b>				
<b>Accesiones</b>	23	370***	23	430***
<b>Residual</b>	107	107 <sub>NS</sub>	117	143 <sub>NS</sub>

<sup>1</sup>grados de libertad; <sup>2</sup>cuadrado medio

NS y \*\*\* indican no significativo para una probabilidad  $p < 0.05$  y significativo para  $p < 0.001$ , respectivamente.

**Tabla 12.** ANOVAs multifactoriales generales de la actividad enzimática de la catalasa en las tres condiciones de muestreo.

Fuente	MITAD DEL CULTIVO		FINAL DEL CULTIVO		RIZOSFERA	
	g.l. <sup>1</sup>	C. M. <sup>2</sup>	g.l.	C. M.	g.l.	C. M.
<b>A:Cultivo</b>	1	0,2021***	1	0,0426***	1	0,0071***
<b>B:Accesión</b>	23	0,002 <sub>NS</sub>	23	0,0013 <sub>NS</sub>	23	0,0011***
<b>A×B</b>	23	0,0039***	23	0,0031***	23	0,0009***
<b>Residuos</b>	135	0,0016	144	0,001	224	0,0004

<sup>1</sup>grados de libertad; <sup>2</sup>cuadrado medio

<sub>NS</sub> y \*\*\* indican no significativo para una probabilidad  $p < 0.05$  y significativo para  $p < 0.001$ , respectivamente.

**Tabla 13.** ANOVAs de la actividad enzimática de la catalasa, específicos para sistema y condiciones de muestreo del cultivo.

Factor	Ecológico		Convencional	
	g.l. <sup>1</sup>	C. M. <sup>2</sup>	g.l.	C. M.
<b>MITAD DEL CULTIVO</b>				
<b>Accesiones</b>	23	0,0036*	23	0,0022*
<b>Residual</b>	65	0,002 <sub>NS</sub>	70	0,0012 <sub>NS</sub>
<b>FINAL DEL CULTIVO</b>				
<b>Accesiones</b>	23	0,0025**	23	0,002**
<b>Residual</b>	65	0,0011 <sub>NS</sub>	79	0,0009 <sub>NS</sub>
<b>RIZOSFERA</b>				
<b>Accesiones</b>	23	0,0009***	23	0,001**
<b>Residual</b>	107	0,0003 <sub>NS</sub>	117	0,0004 <sub>NS</sub>

<sup>1</sup>grados de libertad; <sup>2</sup>cuadrado medio

<sub>NS</sub>, \*, \*\* y \*\*\* indican no significativo para una probabilidad  $p < 0.05$  y significativo para  $p < 0.05$ , 0.01 y 0.001, respectivamente.

## 4.2 Análisis descriptivo de la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina por accesión y cada sistema de cultivo

Como ya se mencionó, para cada tipo y condición de muestreo del cultivo se realizaron ANOVAs específicos. Estos nos arrojan diferencias significativas, pero solo a nivel de rizosfera (Tabla 11), esto debido a la alta variabilidad de algunas accesiones que enmascaran al resto. Para confirmar esto, se realizó la prueba de rangos múltiples para discriminar entre medias mediante el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher (95%), donde vemos como diferentes grupos muestran diferencias significativas entre ellos en cada sistema y condiciones de muestreo del cultivo (Tabla 14).

De esta manera, podemos confirmar que la variabilidad entre las accesiones no solo fue muy alta, sino también la presencia de diferencias significativas entre ellas. El sistema de cultivo dio lugar a diferencias significativas tanto en promedio, como al considerar las accesiones individualmente. En promedio el sistema de cultivo ecológico presentó niveles significativamente mayores en al menos dos condiciones (a mitad del cultivo y a nivel de rizosfera) que el convencional. En el caso del final del cultivo, la diferencia también fue significativa entre medias, pero en este caso siendo superior el cultivo convencional. La considerable caída en esta actividad enzimática al final del cultivo, incluso colocándose muy por debajo de los valores mínimos obtenidos en el muestreo previo al trasplante (inicio del cultivo), puede ser debida a factores del ambiente que en su momento discutiremos.

Ahora bien, con esta información, analizaremos más en detalle, como respondió cada accesión al sistema y condición de muestreo del cultivo.

### 4.2.1 Actividad enzimática de la fosfatasa alcalina a mitad del cultivo

En el sistema ecológico, a la mitad del cultivo, el rango de variación estuvo comprendido entre 291  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Numex Big Jim*) y 413  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Pimiento Gernika*), con una media de 353  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ . En el sistema convencional, el rango de variación estuvo comprendido entre 223  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Doux long*) y 321  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*BOL-144*), con una media de

267  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ . En promedio, el sistema ecológico superó significativamente en un 32% al convencional. Las accesiones que rebasaron en el sistema ecológico a su contraparte en el convencional por encima del incremento promedio fueron: *Pimiento Gernika* (+75%), *Cuneo giallo* (+55%), *BOL-58* (+53%), *Pimiento najerano* (+46%), *Pimiento palmero* (+43%), *Doux long* (+39%), *Ají dulce* (+39%), *Chile de árbol* (+37%) y *Pasilla Bajío* (+35%). En ellas podemos ver, no solo el efecto positivo del sistema de cultivo o la accesión individualmente, sino un plus debido al efecto estadísticamente significativo de la interacción con el sistema ecológico. Otras accesiones con interacciones estadísticamente significativas y que superaron a su contraparte en el sistema convencional, pero que estuvieron por debajo del incremento promedio fueron: *Pimiento de Padrón* (+32%), *Pimiento del Bierzo* (+31%), *Di senise* (+30%), *Numex conquistador* (+29%), *Pimiento de Bola* (+28%), *Piquillo de Lodosa* (+26%), *Espelette* (+26%), *Guindilla Ibarra* (+24%) y *Ancho mulato* (+22%). El resto, aunque si superaron a su contraparte en el cultivo convencional, no hubo interacciones significativas con ninguno de los sistemas.

#### **4.2.2 Actividad enzimática de la fosfatasa alcalina al final del cultivo**

En el sistema ecológico, al final del cultivo, el rango de variación estuvo comprendido entre 51  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Pimiento najerano*) y 85  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*BOL-37*), con una media de 74  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ . En el sistema convencional, el rango de variación estuvo comprendido entre 64  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Ancho mulato*) y 102  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Cuneo giallo*), con una media de 81  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ . En promedio, el sistema ecológico fue inferior en un 9% al convencional. En las interacciones de la mayoría de las accesiones, tanto las que rebasaron en el cultivo ecológico a su contraparte en el convencional, como las que se quedaron por debajo, no fueron significativas. Solo se presentaron tres, las más beneficiadas por el cultivo convencional, que fueron: *Pimiento de Bola* (-17%), *BOL-144* (-19%) y *Cuneo giallo* (-40%), en estas podemos identificar un efecto positivo y significativo de la interacción con el sistema de cultivo convencional en esta condición de muestreo del cultivo.

#### **4.2.3 Actividad enzimática de la fosfatasa alcalina en la rizosfera**

En el sistema ecológico, en la rizosfera, el rango de variación estuvo comprendido entre 71  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Pimiento de Padrón*) y 108  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*BOL-58*), con una media de 85  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ . En el sistema convencional, el rango de variación estuvo comprendido entre 61  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Guindilla Ibarra*, *Pimiento de Bola* y *ECU-994*) y 87  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$  (*Pimiento de Padrón*), con una media de 72  $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ .

En promedio, el sistema ecológico superó en un 18% al convencional. Las accesiones que rebasaron en el sistema ecológico a su contraparte en el cultivo convencional, interactuando significativamente fueron: *Pimiento de Bola* (+62%), *BOL-58* (+59%), *ECU-994* (+45%), *Guindilla Ibarra* (+45%), *Ancho mulato* (+39%), *Pimiento del Bierzo* (+35%), *Di senise* (+29%), *Pimiento Gernika* (+27%), *Pasilla Bajío* (+27%), *Doux long* (+27%), *Pimiento de Arnoia* (+26%), *Cuneo giallo* (+25%), *Pimiento najerano* (+24%) y *Espelette* (+18%). Otra accesión con interacción estadísticamente significativa y que supero a su contraparte en el sistema convencional, pero que estuvo por debajo del promedio fue: *BOL-144* (+17%). En todas ellas podemos ver, no solo el efecto positivo del sistema de cultivo, sino un plus debido a la interacción con el sistema ecológico. Hubo un caso más, en el que una accesión tuvo valores de interacción significativos, pero siendo beneficiado en el sistema convencional, esta fue: *Pimiento de Padrón* (-19%). Del resto de accesiones, aunque rondaron a sus contrapartes en  $\pm 14$  puntos porcentuales, no llegaron presentar interacciones significativas.

**Tabla 14.** Valores medios de la actividad de la fosfatasa alcalina ( $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ ) por accesión en cada sistema de cultivo y condición de muestreo. Agrupamientos de acuerdo con la prueba de rangos múltiples discriminando entre medias por su diferencia mínima significativa (LSD).

Variedades	MITAD DEL CULTIVO		FINAL DEL CULTIVO		RIZOSFERA				
	Ecológico	Convencional	Eco.	Con.	Eco.	Con.			
<i>C. annuum</i>									
Ancho mulato	370 <sub>bcd</sub> <sup>1</sup>	303 <sub>cde</sub>	* <sup>3</sup>	71 <sub>bcd</sub>	64 <sub>a</sub>	NS	86 <sub>cde</sub>	62 <sub>a</sub>	*
Chile de árbol	372 <sub>bcd</sub>	272 <sub>abcde</sub>	*	79 <sub>cde</sub>	79 <sub>abcd</sub>	NS	85 <sub>abcd</sub>	84 <sub>fg</sub>	NS
Chile serrano	309 <sub>ab</sub>	247 <sub>abcd</sub>	NS	69 <sub>abcde</sub>	89 <sub>cde</sub>	NS	82 <sub>abcde</sub>	79 <sub>cdefg</sub>	NS
Cuneo giallo	353 <sub>abcd</sub>	228 <sub>ab</sub>	*	61 <sub>ab</sub>	102 <sub>e</sub>	*	92 <sub>ef</sub>	74 <sub>abcdefg</sub>	*
Di senise	337 <sub>abc</sub>	258 <sub>abcd</sub>	*	82 <sub>cde</sub>	88 <sub>cde</sub>	NS	83 <sub>abcde</sub>	64 <sub>ab</sub>	*
Doux long	311 <sub>ab</sub>	223 <sub>a</sub>	*	76 <sub>bcd</sub>	86 <sub>bcd</sub>	NS	89 <sub>def</sub>	70 <sub>abcdef</sub>	*
Espelette	333 <sub>abc</sub>	265 <sub>abcd</sub>	*	73 <sub>bcd</sub>	88 <sub>bcd</sub>	NS	84 <sub>cde</sub>	71 <sub>abcdef</sub>	*
Guindilla Ibarra	345 <sub>abc</sub>	278 <sub>abcde</sub>	*	77 <sub>cde</sub>	74 <sub>abc</sub>	NS	88 <sub>def</sub>	61 <sub>a</sub>	*
Numex Big Jim	291 <sub>a</sub>	234 <sub>abc</sub>	NS	78 <sub>cde</sub>	85 <sub>bcd</sub>	NS	79 <sub>abcd</sub>	82 <sub>efg</sub>	NS
Numex conquistador	361 <sub>abcd</sub>	280 <sub>abcde</sub>	*	75 <sub>bcd</sub>	78 <sub>abcd</sub>	NS	81 <sub>abcde</sub>	85 <sub>g</sub>	NS
Pasilla Bajío	390 <sub>cd</sub>	289 <sub>bcd</sub>	*	79 <sub>cde</sub>	74 <sub>abc</sub>	NS	87 <sub>def</sub>	68 <sub>abcde</sub>	*
Pimiento de Arnoia	315 <sub>ab</sub>	258 <sub>abcd</sub>	NS	77 <sub>cde</sub>	84 <sub>bcd</sub>	NS	86 <sub>bcd</sub>	68 <sub>abcde</sub>	*
Pimiento de Bola	345 <sub>abc</sub>	270 <sub>abcde</sub>	*	73 <sub>bcd</sub>	89 <sub>cde</sub>	*	98 <sub>fg</sub>	61 <sub>a</sub>	*
Pimiento de Padrón	365 <sub>abcd</sub>	278 <sub>abcde</sub>	*	72 <sub>bcd</sub>	80 <sub>abcd</sub>	NS	71 <sub>a</sub>	87 <sub>g</sub>	*
Pimiento del Bierzo	378 <sub>bcd</sub>	288 <sub>bcd</sub>	*	77 <sub>cde</sub>	73 <sub>abc</sub>	NS	91 <sub>def</sub>	67 <sub>abcd</sub>	*
Pimiento Gernika	413 <sub>d</sub>	236 <sub>ab</sub>	*	78 <sub>cde</sub>	85 <sub>bcd</sub>	NS	81 <sub>abcde</sub>	63 <sub>ab</sub>	*
Pimiento najerano	370 <sub>abcd</sub>	253 <sub>abc</sub>	*	51 <sub>a</sub>	70 <sub>ab</sub>	NS	81 <sub>abcde</sub>	65 <sub>abc</sub>	*
Pimiento palmero	348 <sub>abc</sub>	244 <sub>abc</sub>	*	71 <sub>bcd</sub>	77 <sub>abc</sub>	NS	74 <sub>abc</sub>	84 <sub>fg</sub>	NS
Piquillo de Lodosa	356 <sub>abcd</sub>	282 <sub>bcd</sub>	*	84 <sub>de</sub>	76 <sub>abc</sub>	NS	72 <sub>ab</sub>	80 <sub>defg</sub>	NS
<i>C. chinense</i>									
Ají dulce	373 <sub>bcd</sub>	268 <sub>abcde</sub>	*	83 <sub>de</sub>	74 <sub>abc</sub>	NS	80 <sub>abcde</sub>	75 <sub>bcd</sub>	NS
ECU-994	346 <sub>abcd</sub>	274 <sub>abcde</sub>	NS	66 <sub>abc</sub>	84 <sub>bcd</sub>	NS	88 <sub>def</sub>	61 <sub>a</sub>	*
<i>C. frutescens</i>									
BOL-144	360 <sub>abcd</sub>	321 <sub>e</sub>	NS	77 <sub>cde</sub>	95 <sub>de</sub>	*	92 <sub>ef</sub>	78 <sub>cdefg</sub>	*
<i>C. baccatum</i>									
BOL-37	372 <sub>bcd</sub>	317 <sub>de</sub>	NS	85 <sub>e</sub>	81 <sub>abcde</sub>	NS	87 <sub>def</sub>	74 <sub>abcde</sub>	NS
BOL-58	361 <sub>abcd</sub>	236 <sub>ab</sub>	*	71 <sub>bcd</sub>	82 <sub>bcd</sub>	NS	108 <sub>g</sub>	68 <sub>abcde</sub>	*
<b>Promedio</b>	353 <sub>B</sub> <sup>2</sup>	267 <sub>A</sub>		74 <sub>A</sub>	81 <sub>B</sub>		85 <sub>B</sub>	72 <sub>A</sub>	

<sup>1</sup> a, b, c, d, e, f, g letras minúsculas diferentes dentro de cada columna, implican diferencias significativas entre medias dentro del sistema de cultivo por LSD de Fisher con  $P < 0,05$ .

<sup>2</sup> A, B letras mayúsculas diferentes entre columnas de cada condición de muestreo, implican diferencias significativas entre sistemas de cultivo por LSD de Fisher con  $P < 0,05$ .

<sup>3</sup> \* y NS indican diferencias significativas y no significativas, respectivamente, para cada accesión entre sistemas de cultivo (interacción individual estadísticamente significativa) por LSD de Fisher con  $P < 0,05$ .

### **4.3 Análisis de los cambios en la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina entre sistemas de cultivo y condiciones de muestreo**

#### **Cambios en la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina a mitad del cultivo**

El comportamiento de las medias (Figura 16) y las diferencias significativas entre sistemas de cultivo son similares a los reportados por Fita *et al.* (2014), situando por encima al sistema ecológico, aun cuando aquel muestreo fue realizado al inicio de la etapa reproductiva (inicio de la floración) a los 45 DDT y en este trabajo se realizó al inicio del periodo de cosecha en verde, aproximadamente a los 100 DDT.

#### **Cambios en la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina al final del cultivo**

Contrario a lo reportado por otros autores (*ibid.*), esta condición de muestreo fue caracterizada por una caída considerable en la actividad enzimática en ambos sistemas, como se puede identificar al comparar las medias con el apartado anterior. Esto puede deberse a dos condiciones: la primera, al ser un suelo bajo condiciones de cultivo, ya ha sido demostrado que la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina será dinámica, sensiblemente dependiente del manejo, etapa fenológica del cultivo y las especies vegetales utilizadas (Narváez, 2008; Vallejo, 2011; Henríquez *et al.*, 2014; Fita *et al.*, 2014); y, el segundo, las condiciones meteorológicas, como la pluviometría que contribuye a la solubilización del fósforo y su disponibilidad, disminuyendo así la actividad de la fosfatasa (Rojas, 2002, Cerón, 2011, Corrales *et al.*, 2014). Además, se ha reportado que existe una correlación negativa entre la actividad de la fosfatasa alcalina y la temperatura (Criquet *et al.*, 2004).

Con información de la Asociación Valenciana de Meteorología “Josep Peinado” (AVAMET, 2017), de la estación meteorológica en Sagunto, ubicada en las Lloses (ID: c12m220e01. Coordenadas: 39° 38' 42" N, 00° 16' 57" O) sabemos de la presencia de precipitaciones entre los 30-50 mm en los meses de octubre y noviembre para la región del muestreo. Con respecto a la temperatura, la media de los primeros 15 días de agosto (fechas que rodean el muestreo a mitad del cultivo), con respecto a los últimos 15 de octubre agosto

(fechas que rodean el muestreo al final del cultivo), tienen más de 11°C de diferencia (26,5 y 17,6 °C, respectivamente). Sumado a eso, los DDT (180) nos indican que el cultivo se encontraba al final de su etapa productiva. Así, podemos establecer este conjunto de variables como las causas más probables del descenso en general de la actividad, aunque el modelo experimental en este trabajo no es el adecuado para poder confirmar esta hipótesis.

### **Cambios en la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina a nivel de rizosfera**

Aunque vemos que las medias de la actividad siguen siendo bastante bajas y cercanas a las medias al final del cultivo, también encontramos que se invierten los papeles poniendo nuevamente por arriba al sistema ecológico de manera significativa. Al ser muy cercana la fecha del muestreo anterior y las condiciones ambientales no habían cambiado tanto, no cabría esperar una gran diferencia, pero al ser el muestreo en el sitio con mayor actividad enzimática de la rizosfera, vemos claramente el efecto positivo de la interacción de las variedades con el sistema de cultivo ecológico. Esto coincide con diferentes autores, que han encontrado que la actividad enzimática suele ser más alta en sistemas ecológicos y dependientes de la etapa fenológica (Narváez, 2008; Vallejo 2011).





Figura 16. Medias de la actividad enzimática de la fosfatasa ( $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ ) alcalina por variedad en cada sistema de cultivo en cada muestreo

## 4.4 Análisis descriptivo de la actividad enzimática de la catalasa por accesión y cada sistema de cultivo

Como ya se mencionó, para cada sistema y condición de muestreo del cultivo se realizaron ANOVAs específicos. Estos nos arrojan diferencias significativas en todas las condiciones de muestreo y sistemas de cultivo (Tabla 13). Para poder desentrañar mejor las diferencias entre accesiones en cada sistema y condición de muestreo del cultivo se realizó la prueba de rangos múltiples por LSD (Fisher, 95%), donde vemos como diferentes grupos muestran diferencias significativas entre ellos en cada sistema y condiciones de muestreo (Tabla 15).

De esta manera, podemos confirmar que la variabilidad entre las accesiones no solo fue muy alta, sino también la presencia de diferencias significativas entre ellas, como ya nos indicaban los análisis anteriores desde los análisis anteriores. El sistema de cultivo dio lugar a diferencias notables tanto en promedio, como al considerar las accesiones individualmente. En promedio el sistema de cultivo ecológico presentó niveles significativamente menores en dos condiciones de muestreo (Mitad del Cultivo y Rizosfera) que el convencional. Al final del cultivo, la diferencia también fue significativa, pero en este caso siendo superior el cultivo ecológico. Con esta información, podemos analizar más en detalle, como respondió cada accesión al sistema y condición de muestreo del cultivo.

### 4.4.1 Actividad enzimática de la catalasa a mitad del cultivo

En el sistema ecológico, en la mitad del cultivo, el rango de variación estuvo comprendido entre 0,0779 mmol/g·h (*Chile serrano*) y 0,2445 mmol/g·h (*Espelette*), con una media de 0,1958 mmol/g·h. En el sistema convencional, el rango de variación estuvo comprendido entre 0,2287 mmol/g·h (*Pimiento de Bola*) y 0,3149 mmol/g·h (*Chile serrano*), con una media de 0,2653 mmol/g·h.

En promedio, el sistema ecológico fue inferior en un 26% al convencional. En este caso no hubo ninguna accesión que rebasara en el sistema ecológico a su contraparte en el cultivo convencional. Algunas accesiones tuvieron una interacción significativa y positiva

con el sistema de cultivo convencional, estas fueron: *Chile serrano* (-75%), *Numex Big Jim* (-54%), *BOL-58* (-54%), *Pimiento palmero* (-37%), *Ají dulce* (-29%), *Pasilla Bajío* (-29%), *BOL-37* (-28%), *Di senise* (-28%) y *Numex conquistador* (-28%). En ellas podemos ver claramente un plus, más allá del efecto del sistema de cultivo o accesión, debido a la interacción con el sistema de cultivo convencional. Además, se presentaron dos accesiones más que presentaron interacciones significativas con el sistema de cultivo convencional, pero que no rebasaron al ratio promedio, estas fueron: *Pimiento Gernika* (-24%) y *Guindilla Ibarra* (-23%). El resto no llegó a tener ningún tipo de interacción significativa con ninguno de los sistemas de cultivo.

#### **4.4.2 Actividad enzimática de la catalasa al final del cultivo**

En el sistema ecológico, al final del cultivo, el rango de variación estuvo comprendido entre 0,1579 mmol/g·h (*Pimiento del Bierzo*) y 0,2692 mmol/g·h (*BOL-37*), con una media de 0,2061 mmol/g·h. En el sistema convencional el rango de variación estuvo comprendido entre 0,1413 mmol/g·h (*Chile serrano*) y 0,2262 mmol/g·h (*Pimiento de Padrón*), con una media de 0,1755 mmol/g·h.

En promedio, el sistema ecológico fue superior en un 17% al convencional. Las accesiones que rebasaron en el sistema ecológico a su contraparte en el cultivo convencional notablemente fueron: *BOL-37* (+83%), *ECU-994* (+55%), *Pimiento de Arnoia* (+49%), *Pimiento palmero* (+41%), *Ají dulce* (+35%), *Piquillo de Lodosa* (+34%), *Guindilla Ibarra* (+33%), *Pasilla Bajío* (+33%), *Numex conquistador* (+32%) y *Numex Big Jim* (+32%). En ellas podemos ver como se presenta un plus debido a la interacción significativa entre el sistema de cultivo y las accesiones, rebasando hasta por 66 puntos porcentuales a la situación promedio entre sistemas en esa condición de muestreo del cultivo. El resto de las accesiones, aunque algunas llegaron a superar la media (*Pimiento najerano* y *Pimiento Gernika*), la diferencia en la interacción no fue significativa. El resto, aunque tuvieron valores de ratio aparentemente estaban respondiendo mejor al sistema convencional, esas interacciones no fueron significativas.

#### 4.4.3 Actividad enzimática de la catalasa en la rizosfera

En el sistema ecológico, en la rizosfera, el rango de variación estuvo comprendido entre 0,1227 mmol/g·h (*Pimiento najerano*) y 0,1752 mmol/g·h (*ECU-994*), con una media de 0,1537 mmol/g·h. En el sistema convencional el rango de variación estuvo comprendido entre 0,1442 mmol/g·h (*Ancho mulato*) y 0,1867 mmol/g·h (*BOL-58*), con una media de 0,164 mmol/g·h.

En promedio, el sistema ecológico fue inferior en un 6% al convencional. En este caso hubo algunas accesiones que rebasaron en el sistema ecológico a su contraparte en el cultivo convencional, pero solo *Ancho mulato* (+19%) tuvo un desempeño notable debido a la interacción significativa entre los factores accesión y el sistema de cultivo ecológico. Entre el resto de las accesiones, algunas quedaron con  $\pm 10$  puntos porcentuales con respecto a su contraparte en el otro sistema de cultivo, sin llegar a ser significativa su interacción. Las restantes, tuvieron también una interacción significativa, pero con el sistema de cultivo convencional, estas fueron: *Espelette* (-25%), *Pimiento palmero* (-21%), *BOL-58* (-19%), *Pimiento Gernika* (-18%), *Pimiento najerano* (-17%) y *Doux long* (-16%). En ellas podemos ver el efecto positivo y significativo de la interacción con el sistema de cultivo convencional.

**Tabla 15.** Valores medios de la actividad de la catalasa (mmol/g·h) por accesión en cada sistema de cultivo y condición de muestreo. Agrupamientos de acuerdo con la prueba de rangos múltiples discriminando entre medias por su diferencia mínima significativa (LSD).

ACCESIONES	MITAD DEL CULTIVO		FINAL DEL CULTIVO		RIZOSFERA				
	Ecológico	Convencional	Eco.	Con.	Eco.	Con.			
<i>C. annuum</i>									
Ancho mulato	0,2202 <sup>1</sup> <sub>de</sub>	0,2572 <sub>abcde</sub>	NS <sup>3</sup>	0,1975 <sub>abcdef</sub>	0,1732 <sub>abcdefg</sub>	NS	0,1721 <sub>fg</sub>	0,1442 <sub>a</sub>	*
Chile de árbol	0,2331 <sub>e</sub>	0,2356 <sub>abc</sub>	NS	0,2192 <sub>def</sub>	0,1974 <sub>efghi</sub>	NS	0,1460 <sub>bcd</sub>	0,1471 <sub>abcd</sub>	NS
Chile serrano	0,0779 <sub>a</sub>	0,3149 <sub>e</sub>	*	0,1988 <sub>abcdef</sub>	0,1413 <sub>a</sub>	NS	0,1379 <sub>abcd</sub>	0,1521 <sub>abcdef</sub>	NS
Cuneo giallo	0,1813 <sub>bcd</sub>	0,2318 <sub>abc</sub>	NS	0,1719 <sub>abcd</sub>	0,1846 <sub>abcdefg</sub>	NS	0,1607 <sub>defg</sub>	0,1703 <sub>bcddefghi</sub>	NS
Di senise	0,1827 <sub>bcd</sub>	0,2554 <sub>abcd</sub>	*	0,2178 <sub>cdef</sub>	0,1982 <sub>fghi</sub>	NS	0,1374 <sub>abc</sub>	0,1478 <sub>abc</sub>	NS
Doux long	0,2035 <sub>bcd</sub>	0,2305 <sub>ab</sub>	NS	0,1587 <sub>ab</sub>	0,1935 <sub>defghi</sub>	NS	0,1476 <sub>cde</sub>	0,1750 <sub>fghi</sub>	*
Espelette	0,2445 <sub>e</sub>	0,2804 <sub>cde</sub>	NS	0,1973 <sub>abcdef</sub>	0,1908 <sub>cdefghi</sub>	NS	0,1278 <sub>ab</sub>	0,1711 <sub>defghi</sub>	*
Guindilla Ibarra	0,2032 <sub>bcd</sub>	0,2653 <sub>abcde</sub>	*	0,2145 <sub>cdef</sub>	0,1609 <sub>abcde</sub>	*	0,1629 <sub>efg</sub>	0,1498 <sub>abcde</sub>	NS
Numex Big Jim	0,1377 <sub>abc</sub>	0,3018 <sub>de</sub>	*	0,2178 <sub>cdef</sub>	0,1651 <sub>abcdef</sub>	*	0,1602 <sub>defg</sub>	0,1721 <sub>efghi</sub>	NS
Numex conquistador	0,1990 <sub>bcd</sub>	0,2751 <sub>abcde</sub>	*	0,1966 <sub>abcdef</sub>	0,1488 <sub>ab</sub>	*	0,1522 <sub>cde</sub>	0,1677 <sub>bcddefghi</sub>	NS
Pasilla Bajío	0,1932 <sub>bcd</sub>	0,2709 <sub>abcde</sub>	*	0,2112 <sub>bcd</sub>	0,1591 <sub>abcdef</sub>	*	0,1733 <sub>g</sub>	0,1826 <sub>hi</sub>	NS
Pimiento de Arnoia	0,2090 <sub>cde</sub>	0,2511 <sub>abcd</sub>	NS	0,2352 <sub>fg</sub>	0,1580 <sub>abcde</sub>	*	0,1657 <sub>defg</sub>	0,1661 <sub>abcdefghi</sub>	NS
Pimiento de Bola	0,2103 <sub>cde</sub>	0,2287 <sub>a</sub>	NS	0,2038 <sub>bcd</sub>	0,2096 <sub>hi</sub>	NS	0,1550 <sub>cdefg</sub>	0,1624 <sub>abcdefg</sub>	NS
Pimiento de Padrón	0,2414 <sub>e</sub>	0,2819 <sub>cde</sub>	NS	0,2032 <sub>abcdef</sub>	0,2262 <sub>i</sub>	NS	0,1626 <sub>efg</sub>	0,1566 <sub>abcdefg</sub>	NS
Pimiento del Bierzo	0,1978 <sub>bcd</sub>	0,2452 <sub>abcd</sub>	NS	0,1579 <sub>a</sub>	0,1845 <sub>bcd</sub>	NS	0,1558 <sub>cdefg</sub>	0,1683 <sub>bcd</sub>	NS
Pimiento Gernika	0,2208 <sub>de</sub>	0,2902 <sub>de</sub>	*	0,2047 <sub>abcdef</sub>	0,1743 <sub>abcdefg</sub>	NS	0,1452 <sub>bcd</sub>	0,1774 <sub>ghi</sub>	*
Pimiento najerano	0,1976 <sub>bcd</sub>	0,2460 <sub>abcd</sub>	NS	0,1988 <sub>abcdef</sub>	0,1675 <sub>abcdef</sub>	NS	0,1227 <sub>a</sub>	0,1469 <sub>ab</sub>	*
Pimiento palmero	0,1936 <sub>bcd</sub>	0,3082 <sub>e</sub>	*	0,2238 <sub>efg</sub>	0,1581 <sub>abcde</sub>	*	0,1474 <sub>bcd</sub>	0,1865 <sub>i</sub>	*
Piquillo de Lodosa	0,2207 <sub>de</sub>	0,2556 <sub>abcd</sub>	NS	0,2309 <sub>fg</sub>	0,1724 <sub>abcdefg</sub>	*	0,1617 <sub>defg</sub>	0,1706 <sub>cdefghi</sub>	NS
<i>C. chinense</i>									
Ají dulce	0,1720 <sub>bcd</sub>	0,2430 <sub>abc</sub>	*	0,2243 <sub>efg</sub>	0,1657 <sub>abcdef</sub>	*	0,1581 <sub>cdefg</sub>	0,1588 <sub>abcdefg</sub>	NS
ECU-994	0,2094 <sub>bcd</sub>	0,2467 <sub>abcd</sub>	NS	0,2406 <sub>fg</sub>	0,1551 <sub>abcd</sub>	*	0,1752 <sub>g</sub>	0,1608 <sub>abcdefg</sub>	NS
<i>C. frutescens</i>									
BOL-144	0,2068 <sub>cde</sub>	0,2624 <sub>abcde</sub>	NS	0,1783 <sub>abcde</sub>	0,1733 <sub>abcdefg</sub>	NS	0,1615 <sub>defg</sub>	0,1688 <sub>bcd</sub>	NS
<i>C. baccatum</i>									
BOL-37	0,2012 <sub>bcd</sub>	0,2814 <sub>bcd</sub>	*	0,2692 <sub>g</sub>	0,1471 <sub>abc</sub>	*	0,1472 <sub>bcd</sub>	0,1460 <sub>ab</sub>	NS
BOL-58	0,1419 <sub>ab</sub>	0,3087 <sub>e</sub>	*	0,1743 <sub>abc</sub>	0,2077 <sub>ghi</sub>	NS	0,1516 <sub>cdef</sub>	0,1867 <sub>i</sub>	*
<b>PROMEDIO</b>	0,1958 <sub>A</sub> <sup>2</sup>	0,2653 <sub>B</sub>		0,2061 <sub>B</sub>	0,1755 <sub>A</sub>		0,1537 <sub>A</sub>	0,1640 <sub>B</sub>	

<sup>1</sup> a, b, c, d, e, f, g letras minúsculas diferentes dentro de cada columna, implican diferencias significativas entre medias dentro del sistema de cultivo por LSD de Fisher con  $P < 0,05$ .

<sup>2</sup> A, B letras mayúsculas diferentes entre columnas de cada condición de muestreo, implican diferencias significativas entre sistemas de cultivo por LSD de Fisher con  $P < 0,05$ .

<sup>3</sup> \* y NS indican diferencias significativas y no significativas, respectivamente, para cada accesión entre sistemas de cultivo (interacción individual estadísticamente significativa) por LSD de Fisher con  $P < 0,05$ .

## **4.5 Análisis de los cambios en la actividad enzimática de la catalasa entre sistemas de cultivo y condiciones de muestreo**

### **Cambios en la actividad enzimática de la catalasa a mitad del cultivo**

En ambos sistemas de cultivo podemos ver una mayor actividad que en el resto de las condiciones de muestreo (Figura 17), esto puede deberse a que, en julio y agosto, se registraron las temperaturas más altas de acuerdo con la estación meteorológica en Sagunto (AVAMET, 2017), siendo como media los meses más calientes del 2015. Esto pudo haber tenido como consecuencia que ambas parcelas sufrieran de cierta insuficiencia hídrica e incremento en la salinidad del suelo. Este tipo de condiciones propician el estrés oxidativo, el cual las plantas enfrentan mediante varios sistemas de respuesta, enzimáticos o no. La actividad de la catalasa forma parte importante de estas respuestas, reduciendo ROS de forma eficiente evitando daños a distintos niveles (Willekens *et al.*, 1997; Mhamdi *et al.*, 2010).

Al comparar las medias de ambos sistemas encontramos diferencias significativas entre ambos, siendo el sistema convencional el más alto en lo que se refiere a la actividad enzimática correspondiente. Esto puede deberse a características particulares de cada sistema. Como ya hemos mencionado en la introducción, los sistemas ecológicos promueven el cuidado de la estructura, composición física, química y biológica del suelo, haciéndolos mucho más resilientes ante los fenómenos meteorológicos. Es probablemente por este amortiguamiento que otorga el sistema ecológico, que la actividad no se dispara tanto en como en el convencional (Dora *et al.*, 2008), ya que en este sistema no estaba “sufriendo” tanto las consecuencias del estrés oxidativo.

### **Cambios en la actividad enzimática de la catalasa a final del cultivo**

La disminución en la actividad en el sistema de cultivo convencional coincide con los datos de Rodríguez-Kábana y Truelove (1982), aunque no en magnitud, si en el comportamiento general, que, al acercarse el final del ciclo productivo, estas actividades tienden a disminuir de forma paulatina. Es de notar que existe en este caso, un cambio de la

posición de cada sistema de cultivo, ahora poniendo en primer lugar al sistema ecológico, donde no se presenta la disminución paulatina de la actividad, comportándose de manera más estable, pudiendo deberse a la disponibilidad de nutrientes a partir de la fertilización orgánica del suelo (Dora *et al.*, 2008).

### **Cambios en la actividad enzimática de la catalasa al nivel de rizosfera**

Al llegar a este punto en el que el cultivo está en su fase final, vemos que siguen disminuyendo en su actividad enzimática ambos sistemas, pero nuevamente es el sistema convencional quien toma el primer lugar en la media. Debemos recordar, de acuerdo con los datos de la estación meteorológica en Sagunto (AVAMET, 2017), para esta condición de muestreo había precipitaciones mensuales de consideración, la temperatura había caído a la mitad, siendo las condiciones ideales para el desarrollo de infecciones fúngicas en ambos sistemas. En el sistema ecológico, ante la ausencia plaguicidas aplicados, existe la posibilidad de que distintos organismos interactúen, benéficos y dañinos, situación que permite un control indirecto de estas amenazas. Esta situación no se permite en el sistema convencional, ya que de manera sistémica se realizan aplicaciones de fungicidas (oxicloruro de cobre), eliminando cualquier posibilidad de defensa por parte de otros organismos y generando en el mediano plazo razas más resistentes de los patógenos. Además, el cobre libre como catión ( $\text{Cu}^{+2}$ ) inhibe la actividad de la catalasa cuando se concentra en el suelo (Wyszkowska *et al.*, 2009). La combinación de estos dos factores podría ser la causa de la mayor actividad en el sistema convencional. No solo debe defenderse el cultivo del estrés oxidativo generado por el ataque de hongos (Sharma *et al.*, 2012), sino que, además debe compensar la inactivación de la enzima por el cobre produciendo aún más.

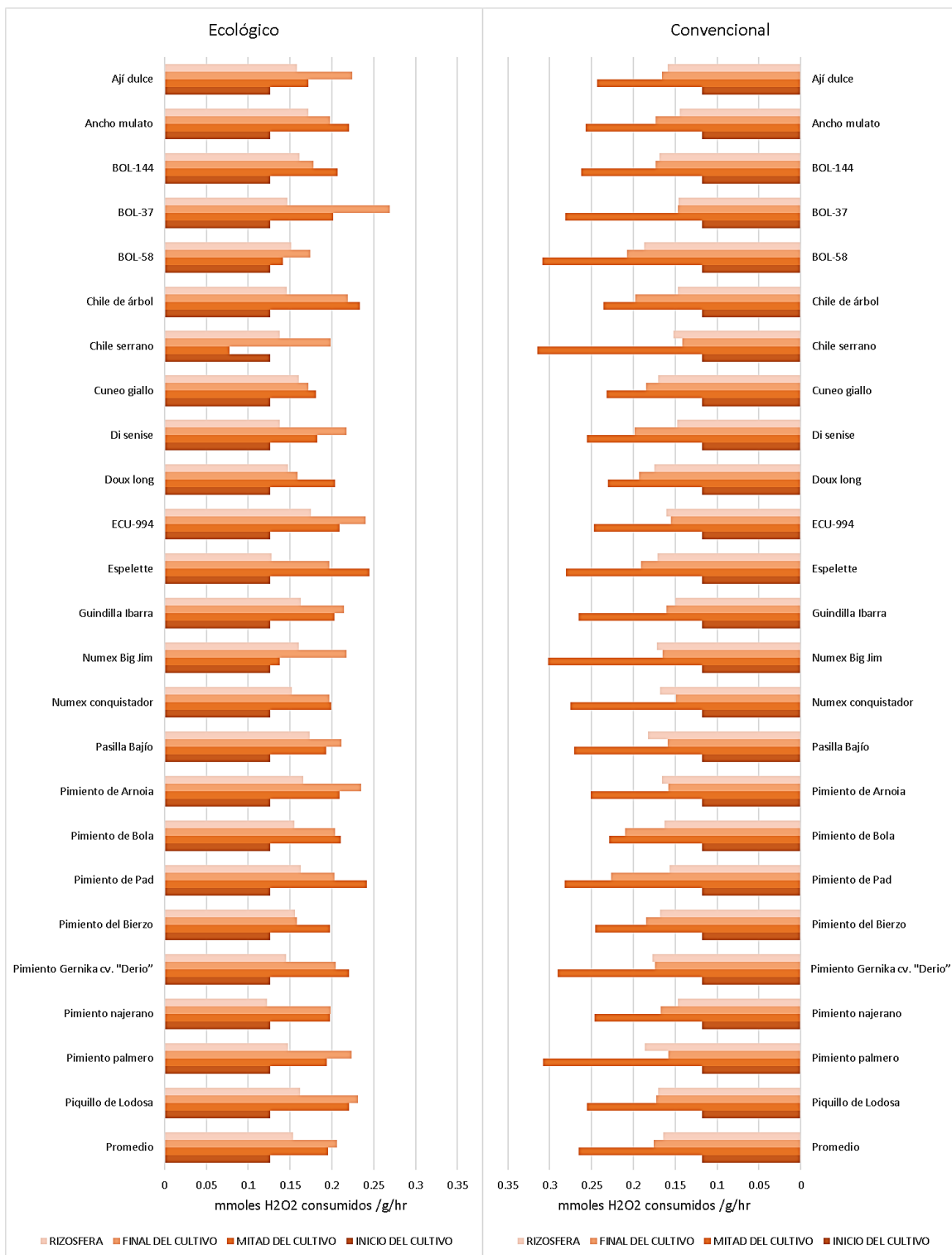


Figura 17. Medias de la actividad enzimática de la catalasa (mmol/g·h) por variedad en cada sistema de cultivo en cada muestreo



## 5. CONCLUSIONES

En síntesis, de acuerdo con los resultados, podemos decir:

- El análisis ANOVA de la fosfatasa alcalina reveló que: a mitad del cultivo tuvieron contribución significativa el sistema de cultivo y el genotipo/accesión, mientras que al final de cultivo y a nivel de rizosfera contribuyeron significativamente el sistema de cultivo y la interacción sistema de cultivo×accesión. En el caso de la catalasa, a mitad y final de cultivo contribuyeron significativamente el sistema de cultivo y la interacción sistema de cultivo×accesión, mientras que a nivel de rizosfera los tres (sistema de cultivo, accesión e interacción sistema de cultivo×accesión) contribuyeron significativamente.
- En promedio, la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina en el sistema de cultivo ecológico fue significativamente mayor frente al convencional en la mayoría de las condiciones de muestreo, salvo a final del cultivo. Por el contrario, la actividad catalasa en el sistema de cultivo convencional fue superior al ecológico en la mayoría de las condiciones de muestreo, a excepción de final del cultivo. En este sentido, hubo aplicaciones sistemáticas de compuestos cúpricos en cultivo convencional, los cuales pueden inhibir la actividad catalasa, causando una probable sobreactividad para compensar esta situación.
- En la actividad fosfatasa se observó una considerable disminución a final del cultivo y a nivel rizosfera con respecto a los niveles de inicio y mitad de cultivo, tanto en ecológico como en convencional, pudiendo deberse tanto a condiciones meteorológicas (mayor humedad y menor temperatura a final del cultivo), así como a la edad del cultivo (fin de su etapa reproductiva, menores requerimientos para movilizar nutrientes). En el caso de la catalasa también se observa una disminución considerable a final de cultivo con respecto a mitad de cultivo en condiciones de cultivo convencional, pero no así en ecológico, en el que esta tendencia mitad cultivo vs. final cultivo está más tamponada y es dependiente de accesión.
- La actividad fosfatasa en rizosfera se mostró similar o más alta que (entre plantas) a final de cultivo en ecológico en la mayoría de accesiones. Las diferencias entre las últimas dos condiciones de muestreo podemos hipotetizar que son debidas a la proximidad del muestreo a las raíces y la disponibilidad de nutrientes (fosforo catión). Por tanto, resultan más fiables muestreos de la zona de la rizosfera para esta enzima.

- Las interacciones entre el sistema de cultivo×accesión, en el nivel de expresión de la actividad fosfatasa y catalasa para las distintas condiciones de muestreo, en general fue dinámica.

- En el caso de la fosfatasa en cada condición de muestreo, la interacción entre el sistema de cultivo×accesión, tuvieron diferente preferencia hacia el sistema ecológico. En mitad del cultivo fue mayoritaria la interacción significativa. Al final del cultivo, no hubo ninguna interacción significativa con el sistema de cultivo ecológico y solo unas cuantas accesiones la tuvieron con el sistema convencional. A nivel de rizosfera nuevamente fue mayoritaria la interacción significativa con el sistema de cultivo ecológico, solo hubo un caso que fuera beneficiado por el sistema convencional. Con esta información, podemos decir que existe una buena posibilidad de seleccionar accesiones con altos niveles de expresión de esta enzima para el sistema de cultivo ecológico, tanto a mitad del cultivo, como a nivel de rizosfera.

- En el caso de la catalasa en cada condición de muestreo, la interacción del sistema de cultivo×accesión mostró preferencia hacia el sistema convencional. En la mitad del cultivo fueron más las accesiones que interactuaron significativamente con el sistema convencional, aunque también hubo accesiones con interacción significativa en el sistema ecológico. Al final del cultivo, nuevamente fueron varias las accesiones con interacción significativa con el sistema convencional. Sin embargo, ahora no hubo ninguna interacción significativa con el sistema de cultivo ecológico. A nivel de rizosfera nuevamente fue la interacción significativa con el sistema convencional la que tuvo más accesiones dentro y solo una para el sistema ecológico.

- En este caso, igualmente podemos decir que existen una buena posibilidad de seleccionar para el sistema de cultivo convencional en todas las condiciones de muestreo. No obstante, también se pueden identificar accesiones que responden bien en ambos sistemas, siendo estables entre sistemas de cultivo y a lo largo de las diferentes condiciones de muestreo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Andrews, J. 1995. Peppers: The domesticated Capsicums. University of Texas Press. Austin, Texas.
- Baral, J. y Bosland, P., 2004. Unraveling the species dilemma in *Capsicum frutescens* and *C. chinense* (Solanaceae): A multiple evidence approach using morphology, molecular analysis, and sexual compatibility. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 129, pp. 826-832.
- Bird, J., 1948. Preceramic cultures in Chicama and Virú. En: Bennett, W. (Comp.). A reappraisal of Peruvian archaeology. The Society for American Archaeology - The Institute of Andean Research. Wisconsin. pp. 21-28.
- Blanco, E y Morales, R., 1990. Plantas curativas y drogas, intercambio entre dos mundos. En: Fernández, J; González, J. (Eds.). La Agricultura Viajera. Cultivos y manufacturas de plantas industriales y alimentarias en España y en la América Virreinal. Real Jardín Botánico. Madrid. pp. 83-95
- Bot, A. y Benites, J., 2005. The importance of soil organic matter: Key to drought-resistant soil and sustained food production. Ed. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma.
- Brodt, S., Six, J., Feenstra, G., Ingels, C. y Campbell, D., 2011. Sustainable Agriculture. *Nature Education Knowledge*. 3, p. 1.
- Cerón, L., 2011. Impacto de contaminantes urbanos sobre la actividad microbiana presente en suelos y sedimentos en una afluyente del río Bogotá. Cuaderno de investigación, Colección gestión ambiental. Universidad EAN. Colombia.
- Céspedes, C., 2005. Agricultura orgánica. Principios y prácticas de producción. Centro regional de Investigación Quilamapu. Chillán. Chile.
- Céspedes, C., 2017. Manejo de la fertilidad del suelo. INIA. Chile.
- Chislock, M., Doster, E., Zitomer, R. y Wilson, A., 2013. Eutrophication: Causes, Consequences, and Controls in Aquatic Ecosystems. *Nature Education Knowledge*. 4, p. 10.
- Corrales, L., Arévalo, Z. y Moreno, V., 2014. Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *NOVA*. 12, pp. 68-79.

- Criquet, S., Ferre, E., Farnet, A. y Le petit, J., 2004. Annual dynamics of phosphate activities in an evergreen oak litter: influence of biotic and abiotic factors. *Soil Biology & Biochemistry*. 36, pp. 1111-1118.
- D'Arcy, W. y Eshbaugh W., 1974. New World peppers (*Capsicum*-Solanaceae) north of Colombia. *Baileya*. 19, pp. 93-105.
- Dora, A., Domuta, C., Ciobanu, C. y Sandor, M., 2008. Field management effects on soil enzyme activities. *Romanian Agricultural Research*. 25, 61-68
- Eshbaugh W., 1975. Genetic and biochemical systematic studies of chili peppers (*Capsicum*-Solanaceae). *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 102, pp. 396-403.
- Fita, A., Martínez, M., Guijarro, C., Rodríguez-Burruezo, A., Raigón, M. 2014. Efecto de la variedad y manejo del cultivo en la actividad enzimática del suelo. XI Congreso de SEAE: "Agricultura ecológica familiar". Vitoria-Gasteiz, Álava.
- García, C., Gil, F., Hernández, T. y Trasar, C., 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Ed. Mundi-Prensa. España.
- García, F. y Picone, L., 2004. Fósforo: Dinámica y manejo en sistema de siembra directa. Instituto de la potasa y el fósforo. *Informaciones agronómicas*. 55, pp. 1-5.
- García-Ruiz, R., Ochoa, V., Hinojosa, M., Carreira, J., 2008. Suitability of enzyme activities for the monitoring of soil quality improvement in organic agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry*. 40, pp. 2137-2145.
- Greenleaf, H. 1986. Pepper breeding. En: Bassett, M. (Ed.) *Breeding vegetable crops*. AVI Publishing Co. Connecticut. pp. 67-134.
- Harlan, J., 1992. *Crops and man*. Segunda edición. American Society Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc. Wisconsin.
- Heiser Jr., C. y Smith, P., 1953. The cultivated *Capsicum* peppers. *Economic Botany*. 7, pp. 214-217.
- Heiser, C. y Pickersgill, B., 1969. Names for the cultivated *Capsicum* species (Solanaceae). *Taxon*. 18, pp. 277-283.
- Heiser, C., 1964. Los chiles y ajíes de Costa Rica y Ecuador. *Ciencia y Naturaleza*. 7, pp. 50-57.

- Henríquez, C., Uribe, L., Valenciano, A., Nogales, R., 2014. Actividad enzimática del suelo -deshidrogenasa,  $\beta$ -glucosidasa, fosfatasa y ureasa- bajo diferentes cultivos. *Agronomía costarricense*. 38, pp. 43-54.
- Hunziker, A., 1998. Studies on Solanaceae. XLVI. Wild peppers of Argentina (*Capsicum*). *Darwiniana*. 36, pp. 201-203.
- Krammer, S. y Green, D., 2000. Acid and alkaline phosphatase dynamics and their relationship to soil microclimate in a semiarid Woodland. *Soil Biology & Biochemistry*. 32, pp. 179-188.
- Laborde, J. y Rendón-Poblete, E., 1989. Tomatoes and peppers in México: Commercial production and research challenges. En: *Tomato and pepper production in the tropics*. Ed. S. K. Green. Taiwan. pp. 521-535.
- Lahbib, K; Bnejdi, F; El Gazzah, M., 2012. Selection of pepper parent from a collection of *Capsicum annuum* landraces based on genetic diversity. *Journal of Plant Breeding and Crop Science*. 5, pp. 68-72.
- Maroto, J., 2002. *Horticultura herbácea especial*. Ed. MundiPrensa. Madrid.
- McLeod, M., Guttman, S., Eshbaugh, W., 1982. Early evolution of chili peppers (*Capsicum*). *Economic Botany*. 36, pp. 361-368.
- Mhamdi, A., Queval, G., Chaouch, S., Vanderauwera, S., Van., F., Noctor, G., 2010. Catalase function in plants: a focus on *Arabidopsis* mutants as stress-mimic models. *Journal of Experimental Botany*. 61, pp. 4197-4220.
- Montejo, M., Torres, C., Martínez, A., Tenorio, J., Cruz, M., Ramos, F., Cuevas, M., 2012. Técnicas para el análisis de actividad enzimática en suelos. En: *Métodos ecotoxicológicos para la evaluación de suelos contaminados con hidrocarburos*. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Instituto Nacional de Ecología (INE), Universidad Veracruzana y Fondos Mixtos CONACYT. Distrito Federal, México.
- Montes, S., 2010. Recopilación y análisis de la información existente de las especies del género *Capsicum* que crecen y se cultivan en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). D.F., México.
- Moscone, E., Scaldaferrro, M., Grabile, M., Cecchini, N., Sánchez García, Y., Jarret, R., Daviña, J., Ducasse, D., Barboza, G., Ehrendorfer, F., 2007. The evolution of chili

- peppers (*Capsicum* - Solanaceae): a cytogenetic perspective. En: Spooner, D., Bohs, L., Giovannoni, J., Olmstead, R., Shibata, D. (Eds.). VIth International Solanaceae Conference: Genomics Meets Biodiversity. Acta Horticulturae. 745, pp. 137-170.
- Namesny, A. 2006. Pimientos. 2ª Edición. Compendios de horticultura 16. Ediciones de horticultura, S.L. Reus. España.
  - Nannipieri, P., Giagnoni, L., Landi, L., Renella, G., 2011. Role of phosphatase enzymes in soil. En: Bunemann, E., Oberson, A., Frossard, E. (Eds.) Phosphorus in Action. Soil Biology 26. Springer Verlag, Berlin. pp. 215-241.
  - Narváez, M., 2008. Evaluación de actividad de fosfatasas y deshidrogenasas por efecto de la aplicación de vinazas en suelos cultivados con maíz dulce *Zea mays* L. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Pogrado en Ciencias Agrarias. Palmira, Colombia.
  - Nuez, F; Gil-Ortega, R; Costa, J. 2003. El cultivo de pimientos, chiles y ajíes. MundiPrensa, Madrid.
  - Pereyra, M., 2001. Asimilación del nitrógeno en plantas. Facultad de agronomía. Universidad de La Pampa. La Pampa, Argentina.
  - Perry, L., Dickau, R., Zarrillo, S., Holst, I., Pearsall, D., Piperno, D., Berman, M., Cooke, R., Rademaker, K., Ranere, A., Raymond, J., Sandweiss, D., Scaramelli, F., Tarble, K., Zeidler, J-A., 2007. Starch fossils and the domestication and dispersal of chili peppers (*Capsicum spp.* L.) in the Americas. Science. 315, pp. 986–988.
  - Pickersgill, B., 1969. The archeological record of chili peppers (*Capsicum spp.*) and the sequence of the domestication in Peru. American Antiquity. 34, pp. 54-61.
  - Pochard, E. 1966. Donnees experimentales sur la selection du piment (*Capsicum annum* L.). Annales de l'Amélioration des Plantes. 16, pp. 185-197.
  - Pozo, O., Montes, S., Redondo, E., 1991. Chile (*Capsicum spp.*). En: Ortega, R., Palomino, G., Castillo, F., Gozález, V., Linera, M. (Eds.). Avances en el estudio de los recursos fitogenéticos de México. Sociedad Mexicana de Fitogenética, A. C. Chapingo, México. pp. 217-238
  - Rodríguez-Kábana, R. y Truelove, B., 1982. Effects of crop rotation and fertilization on catalase activity in a soil of the southeastern United States. Plant and Soil. 69, pp. 97-104.



- Rojas, C., 2002. Tecnologías y prácticas en el manejo de los recursos naturales para la recuperación de los suelos degradados. Instituto de Investigaciones Agrarias. Serie Actas N° 15. Chile.
- Sharma, P., Bhushan, A., Shanker, R., Pessaraki, M., 2012. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. *Journal of Botany*. 2012, pp. 1-26.
- Skewes, O., 2006. Factores limitantes. Tema 06. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Smith, P. y Heiser Jr., C., 1957. Taxonomy of *Capsicum sinense* Jacq. and the geographic distribution of the cultivated Capsicum species. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. 84, pp. 413-420.
- Smith, P., Villalón, B. y Villa, P., 1987. Horticultural classification of peppers grown in the United States. *HortScience* 22, pp. 11-13.
- Sutton, M., Bleeker, A., Howard, C., Bekunda, M., Grizzetti, B., de Vries, W., van Grinsven, H., Abrol, Y., Adhya, T., Billen, G., Davidson, E., Datta, A., Diaz, R., Erisman, J., Liu, X., Oenema, O., Palm, C., Raghuram, N., Reis, S., Scholz, R., Sims, T., Westhoek, H., Zhang, F., 2013. Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution; Global Overview of Nutrient Management. Centre for Ecology and Hydrology. Edinburgh.
- Tabatabai, M. y Bremmer, J., 1969. Use of *p*-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*. 1, pp. 301-307.
- Thompson, H., y Kelly, W., 1957. Vegetable crops. Ed. McGraw Hill. Nueva York-Toronto-Londres.
- Tiessen, A., 2012. Fundamentos de mejoramiento genético vegetal. Conceptos básicos de genética, biología molecular, bioquímica y fisiología vegetal. CINVESTAV. Guanajuato, México.
- Vallejo, C., 2011. Influencia de la gestión del residuo de una cubierta verde de *Lolium multiflorum* en la dinámica microbiana edáfica. Universidad Pública de Navarra – Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Navarra, España.
- Watkins, J., y Cantalife, C., 1983. Hormonal control of pepper seed germination. *HortScience*. 18, pp. 342-343

- Willekens, H., Chamnongpol, S., Davey, M., Schraudner, M., Langerbartels, C., Van, M., Inzé, D., Van, W., 1997. Catalase is a sink for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and is indispensable for stress defence in C<sub>3</sub> plants. *The EMBO Journal*. 16, pp. 4806-4816.
- Wyszowska, J., Kucharski, M., Kucharski, J., Borowik, A., 2009. Activity of dehydrogenases, catalases and urease in copper polluted soil. *Journal of Elementology*. 14, pp. 605-617.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Área cultivada en hectáreas y producción en miles de toneladas a nivel mundial de las principales hortalizas en 2014. (FAOSTAT, 2017).-----	1
Tabla 2. Área cultivada en hectáreas y producción en toneladas de pimiento en fresco en los diferentes continentes y su porcentaje respecto al mundial en 2014. (FAOSTAT, 2017).----	3
Tabla 3. PIMIENTO: Análisis provincial en España de superficie (hectáreas), rendimiento (kilogramos por hectárea) y producción (toneladas), 2016 (MAPAMA, 2017).-----	4
Tabla 4. Especies del género <i>Capsicum</i> , su condición cultivada (C) o silvestre (S); el grupo al que pertenecen considerando color de flor (Fb=blanca; Fp=púrpura) y su agrupación filial artificial (GCA=Complejo <i>C. annuum</i> ; GCB=Complejo <i>C. baccatum</i> ; GCP=Complejo <i>C. pubescens</i> ), así como su distribución geográfica (Montes, 2010).-----	7
Tabla 6. Clasificación de cultivares de pimiento en EE. UU. (Smith et al., 1987).-----	18
Tabla 7. Principales chiles cultivados en México (Laborde y Rendón Poblete, 1989; Pozo et al. 1991). -----	18
Tabla 8. Clasificación de cultivares de fruto grande y dulce (Pochard, 1966, y modificaciones de Nuez et al. 2003).-----	19
Tabla 9. Acciones utilizadas, identificador, nombre local, nombre científico y procedencia.-----	33
Tabla 10. ANOVAs multifactoriales generales de la actividad enzimática de la fosfatasa a mitad y final de cultivo y en la zona de la rizosfera.-----	42
Tabla 11. ANOVAs de la actividad enzimática de la fosfatasa alcalina, específicos para sistema y condiciones de muestreo del cultivo.-----	42
Tabla 12. ANOVAs multifactoriales generales de la actividad enzimática de la catalasa en las tres condiciones de muestreo.-----	43
Tabla 13. ANOVAs de la actividad enzimática de la catalasa, específicos para sistema y condiciones de muestreo del cultivo.-----	43

Tabla 14. Valores medios de la actividad de la fosfatasa alcalina ( $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ ) por accesión en cada sistema de cultivo y condición de muestreo. Agrupamientos de acuerdo con la prueba de rangos múltiples discriminando entre medias por su diferencia mínima significativa (LSD).-----47

Tabla 15. Valores medios de la actividad de la catalasa ( $\text{mmol/g}\cdot\text{h}$ ) por accesión en cada sistema de cultivo y condición de muestreo. Agrupamientos de acuerdo con la prueba de rangos múltiples discriminando entre medias por su diferencia mínima significativa (LSD).-  
-----54

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de la producción mundial por país de chile fresco, 2014 (FAOSTAT, 2017)-----	2
Figura 2. Porcentaje de la producción mundial de chile seco por país, 2014 (FAOSTAT, 2017)-----	3
Figura 3. Flor característica y variabilidad de frutos de <i>C. annuum</i> -----	10
Figura 4. Flor característica y variabilidad de frutos de <i>C. baccatum</i> var. <i>pendulum</i> -----	11
Figura 5. A: Rama Fructífera; B: Flor vista lateral; C: Sector de la corola desplegada; D y E: Gineceo, brevistilado y longistilado, respectivamente; F y G: Anteras, vista dorsal y ventral, respectivamente; <i>C. baccatum</i> var. <i>umbilicatum</i> , por N. de Flury-----	12
Figura 6. Flor característica y frutos mostrando la característica constricción anular de <i>C. chinense</i> -----	13
Figura 7. Flor característica y frutos aun en planta de <i>C. frutescens</i> -----	14
Figura 8. Flor característica y frutos de con semillas oscuras características de <i>C. pubescens</i> -----	14
Figura 9. Esquema geográfico de la especiación de <i>Capsicum</i> de acuerdo con Montes (2010). Abreviación de los nombres de las especies: ann = <i>C. annuum</i> , bac = <i>C. baccatum</i> , cam = <i>C. campylopodium</i> , car = <i>C. cardenasii</i> , cha = <i>C. chacoense</i> , chi = <i>C. chinense</i> , cor = <i>C. cornutum</i> , exi = <i>C. eximium</i> , fle = <i>C. flexuosum</i> , fri = <i>C. friburgense</i> , fru = <i>C. frutescens</i> , gal = <i>C. galapagoense</i> , lan = <i>C. lanceolatum</i> , mir = <i>C. mirabile</i> , par = <i>C. parvifolium</i> , per = <i>C. pereirae</i> , pra = <i>C. praetermissum</i> , pub = <i>C. pubescens</i> , rec = <i>C. recurvatum</i> , rho = <i>C. rhomboideum</i> , sch = <i>C. schottianum</i> , tov = <i>C. tovarii</i> , vil = <i>C. villosum</i> -----	16
Figura 10. Crecimiento del área destinada para agricultura ecológica por continente 2007-2015 (FiBL-IFOAM survey 2009-2017)-----	23
Figura 11. Distribución del área utilizada para agricultura ecológica por región (FiBL, 2016)-	24

Figura 12. Principales países europeos por área destinada para agricultura ecológica [ha] (FiBL, 2015)-----	24
Figura 13. Localización de la parcela con manejo ecológico-----	34
Figura 14. Localización de la parcela con manejo convencional-----	35
Figura 15. Toma de muestra de suelo entre plantas-----	36
Figura 16. Medias de la actividad enzimática de la fosfatasa ( $\mu\text{mol/g}\cdot\text{h}$ ) alcalina por variedad en cada sistema de cultivo en cada muestreo-----	50
Figura 17. Medias de la actividad enzimática de la catalasa ( $\text{mmol/g}\cdot\text{h}$ ) por variedad en cada sistema de cultivo en cada muestreo-----	57