

CRECIMIENTO DE PLANTAS DE PAPA (*Solanum tuberosum* L.) cv. ALPHA, INDUCIDO POR DIVERSAS SOLUCIONES SALINAS

EDGAR SÁNCHEZ-BERNAL, MANUEL ORTEGA-ESCOBAR,
VÍCTOR GONZÁLEZ-HERNÁNDEZ, MARCO CAMACHO-ESCOBAR
y JOSUÉ KOHASHI-SHIBATA

RESUMEN

Se estudió en macetas el crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, en condiciones de estrés inducido por sales (NaCl , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) y por las salinidades sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica, a concentraciones de 0,00 a $9,60\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$. Cada sal y tipo de salinidad produjo un retardo diferencial de la emergencia de brotes, en íntima relación con su porcentaje de brotación analizado en la fase experimental anterior. Dicho retraso obedece a 1) el efecto osmótico de NaCl , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, salinidades clorhídrico-sulfática y sulfático-clorhídrica, y 2) al efecto tóxico de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 y

salinidad sulfático-sódica. Ambos efectos incrementan el periodo de quiescencia de los tubérculos, siendo más agudo el efecto tóxico de las sales sódico-alcalinas. El estrés salino prolongó la duración de las etapas de crecimiento vegetativo y retrasó la iniciación de tubérculos. El escaso desarrollo foliar al momento de la iniciación de los tubérculos originó una lenta tasa de crecimiento de los mismos, produciendo papa pequeña. El fenómeno fue más pronunciado en las plantas sometidas a salinidad sulfático-sódica y NaHCO_3 , a concentraciones superiores a $3,84\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, donde se formaron plantas con enanismo y ausencia de tubérculos.

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es el cuarto cultivo más importante en el orbe. Su riqueza nutritiva y producción en suelos aridisoles con riego ha provocado la incorporación de más tierras al cultivo, sobre todo en países con alta densidad de población como China, que cultiva 1×10^6 ha con un rendimiento promedio de $13,6\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. En México la papa es cultivada en 72×10^3 ha y su rendimiento medio es de $30\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Sin embargo, los suelos se encuentran afectados por procesos de salinización o alcalinización, y sus aguas de irriga-

ción incrementan cada vez más su concentración salina, por lo que existe el riesgo de que la papa disminuya su frontera de cultivo y potencial productivo.

Bernstein (1964) investigó el comportamiento de la planta en soluciones de NaCl con conductividades eléctricas de $3\text{-}6\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ obteniendo como resultado una disminución del 50% en rendimiento, y la clasificó como moderadamente sensible a salinidad clorhídrica. Levy (1992) experimentó con cultivares de papa sometidos a soluciones de NaCl y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, con conductividades eléctricas de $6,1\text{-}6,9\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$,

las que produjeron retraso en la emergencia de plántulas, reducción del crecimiento de tallos y tubérculos y retardo en la maduración, siendo las variedades tempranas más resistentes a la salinidad que las tardías. En 1996 Martínez *et al.* señalaron que la cv. Alpha fue sensible a salinidad clorhídrica; en 2003 Sánchez *et al.*, estudiaron la emergencia y acumulación de biomasa de brotes de tubérculos cv. Alpha sometidos a concentraciones de $0,00\text{-}9,60\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ de diversas sales puras, concluyendo que los brotes fueron sensibles a NaHCO_3 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, moderadamente sensibles a NaCl y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$,

PALABRAS CLAVE / Crecimiento / Efecto Osmótico / Efecto Tóxico / Estrés Salino / Papa / *Solanum tuberosum* /

Recibido: 27/08/2007. Modificado: 08/08/2008. Aceptado: 11/08/2008.

Edgar Iván Sánchez Bernal. Ingeniero Agrícola, Universidad Nacional Autónoma de México; Maestro y Doctor en Ciencias, Colegio de Postgraduados (COLPOS), Montecillo, México; Profesor Investigador, Universidad del Mar (UMAR), México. Dirección: Km. 1.5 carretera a Zipolite, 70902 Puerto Ángel, Oaxaca, México. e-mail: edgarivansb@zicatela.umar.mx.

Manuel Ortega Escobar. Ingeniero Agrónomo y Maestro en Ciencias, COLPOS, Montecillo, México. Doctor en Ciencias, Instituto de Agroquímica y Pedología. RSS de Uzbekistan. Profesor Investigador, COLPOS, Montecillo, México

Víctor González Hernández. Ingeniero Agrónomo, Universidad Autónoma Chapingo (UACH), México. Maestro en Ciencias, COLPOS, Montecillo, México. Ph.D., University of Nebraska, EEUU. Profesor Investigador, COLPOS, Montecillo, México.

Marco Camacho Escobar. Médico Veterinario Zootecnista, Universidad Autónoma Metropolitana, México; Maestro en Ciencias y Doctor en Ciencias, COLPOS, Montecillo, México. Profesor Investigador, UMAR, México.

Josué Kohashi Shibata. Ingeniero Agrónomo UACH, México. M.Sc., Cornell University, EEUU. Ph.D., Harvard University, EEUU. Profesor Emérito, COLPOS, Montecillo, México.

moderadamente tolerantes a Na_2SO_4 , y tolerantes a $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

El presente trabajo analiza la acumulación de biomasa de plantas de papa en las etapas vegetativa, de iniciación, crecimiento y maduración del tubérculo, en condiciones de estrés inducido por las sales y concentraciones referidas, pero también por las salinidades: sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica, de común ocurrencia en las cuencas endorréicas donde se produce el cultivo de papa en México.

Materiales y Métodos

En macetas experimentales de plástico conteniendo 10kg de agrolita y una cubierta de tezontle de 2cm de espesor, bajo invernadero, se plantaron tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha con una densidad de dos tubérculos por maceta, espaciados 15cm uno de otro. A cada maceta se aplicó 2 litros de solución salina. Los tratamientos, diseñados como experimentos independientes, utilizaron las sales NaCl , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, y las salinidades sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica, más un testigo (C_0) con agua destilada y seis niveles de salinidad (C_1 - C_6) con conductividades eléctricas teóricas en solución de 1,77; 3,88; 6,00; 8,11; 10,00 y $15,00 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, las cuales disminuyen (Maas y Hoffman, 1977) el crecimiento o rendimiento en el orden de 0 (C_1), 25 (C_2), 50 (C_3), 75 (C_4), 100 (C_5) y 150% (C_6). Se estableció un modelo bloques al azar con tres réplicas por tratamiento.

Las soluciones se prepararon en laboratorio. Las de salinidad sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica se obtuvieron mediante las relaciones aniónicas y catiónicas $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} = 1,5$; $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} = 0,6$; $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-} = 2,0$; respectivamente establecidas por Arinushkina (Kovda, 1977). Las dos primeras salinidades son mezcla de NaCl y MgSO_4 y la sulfático-sódica lo es de MgCl_2 , Na_2SO_4 y NaHCO_3 . A las soluciones se les determinó el pH con un potenciómetro Beckman, la conductividad eléctrica (CE; $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$) con un puente de Wheatstone y el potencial osmótico ($\Psi\pi$; MPa) con un osmómetro Vapro Wescor 5520. Adicionalmente, se preparó una solución nutritiva de Steiner (1984) con fórmula 140-80-210, la cual fue vertida a cada uno de los contenedores de las soluciones salinas que a su vez se suministraron a las macetas debidamente sembradas.

Mediante riego se repuso el agua consumida por evapotranspiración cada tercer día, a fin de mantener unidades experimentales a peso constante. La temperatura del invernadero fue de $15\text{-}30^\circ\text{C}$. El experimento se realizó del 18/02/2002

al 18/06/2002 y abarcó las fases vegetativa, de iniciación, crecimiento y maduración del tubérculo, y durante ellas se protegió a las plantas contra tizón tardío (*Phytophthora infestans*) aplicando un fungicida sistémico. Un brote de papa emergido se consideró aquel tallo visible inmediatamente arriba del sustrato (Moorby y Milthorpe, 1983). Para evaluar crecimiento, se dejó un brote por tubérculo. Cada planta constó de un tallo principal, lo que arrojó dos plantas por maceta.

Se realizaron tres determinaciones de altura de plantas y número de hojas por planta a los 20, 50 y 80 días después de la emergencia. Las plantas se cosecharon, separando órganos subterráneos y aéreos. Se determinó el número y diámetro de tubérculos hijos por planta, la longitud radical y el peso fresco y seco de cada una de las partes; registrándose el promedio de seis plantas por tratamiento. El análisis de crecimiento consideró el número de hojas maduras (Aitken, 1977); la longitud del tallo (cm), desde la superficie del suelo hasta el ápice del tallo; la tasa de incremento de longitud del tallo mediante la fórmula $\text{TIL} = [\text{LT}_2 - \text{LT}_1] / (t_2 - t_1)$, donde LT_2 y LT_1 : longitud del tallo principal al final y al inicio de un periodo determinado, y t_2 y t_1 : tiempo final e inicial del periodo dado; longitud de la raíz (cm) medida desde la yema axilar del tubérculo madre hasta el ápice más distante. El área foliar por planta se midió en hojas del tercio medio con un integrador de área Licor LI-3100 y se calculó dicha área por regresión lineal entre el peso seco de las láminas y el área de cada lámina. La acumulación de biomasa se determinó sumando el peso seco (g) de la raíz, tubérculos y parte aérea de las plantas, y la acumulación proporcional de biomasa se obtuvo dividiendo el peso seco de cada órgano entre el peso seco total de la planta. Se calibró un modelo lineal de predicción del peso seco total de plantas (PST) en función de la CE de las soluciones mediante la ecuación $y = A + Bx$, donde y : peso seco total de la planta (g), A : ordenada al origen, B : pendiente de la recta o número de unidades (g) que aumenta o disminuye el PST por unidad de incremento de la CE en la solución, y x : CE de la solución ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$). También se evaluó el índice de área foliar (Watson, 1947) como $\text{IAF} = \text{área foliar por planta} / \text{área de terreno ocupado por la planta}$, así como la duración del área foliar en días de acuerdo a la fórmula $\text{DAF} = [(\text{IAF}_1 + \text{IAF}_2)] / (t_2 - t_1) / 2$, donde IAF_1 e IAF_2 : índices de área foliar determinados en los momentos t_1 y t_2 después de la emergencia (Hunt, 1982). Los análisis de regresión lineal y varianza, para determinar diferencias significativas con $P < 0,05$ se efectuaron mediante el sistema de análisis estadístico SAS (1996).

Resultados y Discusión

Efectos en la emergencia de brotes

El tipo de sal y la concentración de las soluciones produjo, en primer término, una disminución del porcentaje de brotación y en segundo lugar un retraso en la emergencia de brotes que fue más agudo en los tubérculos sometidos a NaHCO_3 y salinidad sulfático-sódica, cuyas soluciones registraron pH alcalinos. Al respecto Moorby y Milthorpe (1983) señalan que en condiciones alcalinas la planta de papa inhibe la brotación. El efecto producido por el resto de las sales fue menos intenso, lo cual guarda relación con pH ácidos, a los que está adaptada la planta (Tabla I). En general, el retraso en la emergencia se atribuye al estrés que producen las sales al interior del tubérculo, ya que según Stroganov (1964) el déficit hídrico y la toxicidad iónica inhiben las sustancias de crecimiento tales como la nitrato reductasa y las poliaminas, alteran los niveles hormonales (mayor producción de ácido absísico que de giberelinas) y deshidratan o provocan el desprendimiento del protoplasma de la pared celular, lo que incrementa el periodo de quiescencia. Una vez adaptado el tubérculo al estrés incentiva sus procesos metabólicos y uso de sustancias de reserva para promover brotación, fenómeno observado un mes después de la siembra. Este comportamiento se relaciona con una regulación osmótica al interior del tubérculo o con condiciones hídricas del sustrato que favorecen una periodicidad del crecimiento como el riego. El estrés hídrico y/o tóxico guarda relación con la disminución del potencial osmótico en las soluciones salinas, el que presentó el orden $\text{NaCl} > \text{salinidad sulfático-sódica} > \text{salinidad sulfático-clorhídrica} > \text{NaHCO}_3 > \text{salinidad clorhídrico-sulfática} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, secuencia que se atribuye a características químicas de cada soluto, tales como peso molecular, grado de ionización y coeficiente osmótico (Keenan *et al.*, 1990), de tal manera que el efecto de las sales en el crecimiento y desarrollo de las plantas puede ser de carácter osmótico, como el producido por NaCl o tóxico generado por $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Sánchez *et al.*, 2003).

Expansión foliar durante el crecimiento

Los datos de la Tabla II indican un efecto diferencial del tipo de sal y concentración en la formación de hojas por planta. En la etapa de crecimiento vegetativo los tratamientos salinidad clorhídrico-sulfática, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y salinidad sulfático-clorhídrica indujeron la formación de ocho hojas fotosintéticamente activas en el intervalo $1,13\text{-}5,90 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Las plantas crecidas en $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaCl y Na_2SO_4 formaron ese número de hojas hasta una concentración de $3,84 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ el primero, de $1,13 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ el segundo y

de 2,48g·l⁻¹ los dos restantes, después de lo cual el número de hojas disminuyó a un promedio de siete hojas por planta, lo que se atribuye a un estímulo nutritivo aprovechado por las plantas para el crecimiento inicial de órganos hasta una concentración determinada, disminuyendo después el crecimiento debido al efecto osmótico y tóxico de las sales (Poljakoff y Lerner, 1994). Por su parte, en las plantas sometidas a soluciones de NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica la formación foliar se inhibió después de 2,48g·l⁻¹, fenómeno más acentuado con NaHCO₃. El efecto es inherente a la toxicidad y alcalinidad de estas sales en el medio de crecimiento, que limitan el suministro de carbohidratos y almidón del tubérculo madre hacia los órganos aéreos en crecimiento (Nadler y Heuer, 1995).

Las plantas retrasaron su periodo de tuberización por cerca de diez días en todos los tratamientos, incluyendo el testigo. El retraso se vincula al escaso desarrollo del área foliar; cuyo índice (1,0-1,5) incluyendo el testigo fue de un valor inferior al necesario para inducir tuberización, que es ~2,0 (Khurana y McLaren, 1982). En las plantas crecidas en soluciones de CaCl₂·2H₂O y salinidad clorhídrico-sulfática a concentraciones de 5,19 a 2,48g·l⁻¹ respectivamente, el índice de área foliar fue >2,0. La inferencia estadística indica que todos los tratamientos, excepto NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica, fueron homogéneos al registrar 11-13 hojas hasta una concentración de 6,40g·l⁻¹ en tanto que estos últimos tratamientos fueron significativamente diferentes al inducir un menor número de hojas por planta. En 9,60g·l⁻¹ hubo una diferencia significativa, dadas las pocas hojas formadas.

Para Nadler y Heuer (1998) el escaso desarrollo foliar al inicio origina una lenta tasa

TABLA I
EFECTO DE LA CE, PH Y POTENCIAL OSMÓTICO DE SOLUCIONES SALINAS EXPERIMENTALES, EN EL PORCENTAJE DE BROTAJÓN DE TUBÉRCULOS DE PAPA, DIVERSOS DÍAS DESPUÉS DE LA SIEMBRA

Sal Testigo	Concentración g L ⁻¹	CE medida dS m ⁻¹	pH	Ψπ Mpa	Porcentaje de brotación			
					16 días	23 días	30 días	50 días
I, (NaCl) A ¹	0,00	0,00	7,3	0,00	50,55	83,88	97,21	97,21 a ²
	1,13	2,07	6,3	-0,15	20,00	96,66	99,99	99,99 a
	2,48	4,47	6,2	-0,22	3,33	46,66	93,32	93,32 ba
	3,84	6,93	6,1	-0,26	3,33	66,66	96,66	96,66 ba
	5,19	8,81	6,2	-0,35	0,00	50,00	83,33	83,33 ba
	6,40	10,86	6,2	-0,50	0,00	20,00	96,66	96,66 ba
	9,60	15,27	6,3	-0,67	0,00	10,00	63,32	63,32 b*
II, (NaHCO ₃) C* ¹	1,13	1,14	8,2	-0,14	13,33	39,99	79,99	86,65 a
	2,48	1,50	8,3	-0,19	0,00	0,00	36,66	43,32 b*
	3,84	3,25	8,4	-0,21	0,00	0,00	10,00	30,00 b*
	5,19	4,27	8,6	-0,25	0,00	0,00	0,00	26,66 b*
	6,40	5,08	8,6	-0,30	0,00	0,00	0,00	6,66 b*
	9,60	6,93	8,5	-0,38	0,00	0,00	0,00	6,66 b*
	III, (Na ₂ SO ₄) BA ¹	1,13	1,68	6,2	-0,12	53,33	76,66	86,66
2,48		3,00	6,2	-0,15	33,33	93,33	99,99	99,99 ba
3,84		4,39	6,2	-0,17	26,66	46,66	79,99	79,99 ba
5,19		4,97	6,3	-0,22	0,00	26,66	79,99	79,99 ba
6,40		6,17	6,2	-0,24	0,00	13,33	63,33	63,33 b*
9,60		7,93	6,2	-0,36	0,00	0,00	59,99	59,99 b*
IV, (CaCl ₂ ·2H ₂ O) A ¹		1,13	1,59	6,5	-0,11	50,00	86,66	99,99
	2,48	3,00	6,5	-0,16	26,66	76,66	93,32	93,32 ba
	3,84	4,17	6,5	-0,20	30,00	56,66	86,66	96,66 ba
	5,19	5,05	6,5	-0,24	36,66	79,99	96,66	96,65 ba
	6,40	6,46	6,5	-0,26	3,33	73,33	99,99	99,99 ba
	9,60	8,22	6,5	-0,34	26,66	56,66	96,66	96,66 ba
	V, (MgCl ₂ ·6H ₂ O) A ¹	1,13	1,00	6,9	-0,12	36,66	83,32	99,98
2,48		2,23	6,8	-0,15	33,33	96,66	99,99	99,99 ba
3,84		3,40	7,8	-0,20	33,33	86,66	99,99	99,99 ba
5,19		4,35	7,2	-0,23	26,66	93,32	99,98	99,98 ba
6,40		5,29	7,1	-0,25	10,00	70,00	96,66	99,99 ba
9,60		7,40	7	-0,31	0,00	33,33	83,33	96,66 ba
VI, (MgSO ₄ ·7H ₂ O) A ¹		1,13	0,90	7,1	-0,09	43,33	76,66	99,99
	2,48	1,64	7	-0,11	46,66	79,99	96,65	96,65 ba
	3,84	2,29	7	-0,13	26,66	73,32	96,65	96,65 ba
	5,19	2,70	7	-0,16	16,66	69,99	86,56	86,56 ba
	6,40	3,29	7	-0,17	10,00	66,66	89,99	89,99 ba
	9,60	4,64	7	-0,22	0,00	43,33	59,99	59,99 b*
	VII, Sulfático-clorhídrica BA ¹	1,13	1,85	5,2	-0,13	16,66	69,66	89,66
2,48		4,05	5,5	-0,17	0,00	50,00	96,66	96,66 ba
3,84		5,82	5,6	-0,22	3,33	6,66	89,99	89,99 ba
5,19		7,64	5,6	-0,27	10,00	30,00	93,33	93,33 ba
6,40		8,99	5,9	-0,33	13,33	56,66	96,66	96,66 ba
9,60		12,92	5,9	-0,50	0,00	3,33	69,99	73,32 b*
VIII, Clorhídrico-sulfática BA ¹		1,13	1,62	6,9	-0,14	26,66	76,66	89,99
	2,48	3,52	6,7	-0,15	6,66	63,32	86,65	86,65 ba
	3,84	5,11	6,9	-0,18	6,66	39,99	99,99	99,99 ba
	5,19	6,81	6,9	-0,22	3,33	43,33	83,33	83,33 ba
	6,40	7,88	6,7	-0,27	3,33	26,66	83,32	83,32 ba
	9,60	11,16	6,5	-0,37	0,00	13,33	59,99	69,99 b*
	IX, Sulfático-sódica BC ¹	1,13	2,33	7,90	-0,14	3,33	56,66	99,99
2,48		2,94	8,00	-0,18	16,66	76,66	99,99	99,99ba
3,84		5,29	8,00	-0,21	0,00	3,33	36,66	36,66b*
5,19		6,23	8,00	-0,26	3,33	9,99	46,65	46,65b*
6,40		7,40	8,10	-0,29	0,00	0,00	43,33	43,33b*
9,60		9,75	8,10	-0,56	0,00	0,00	10,00	10,00b*

¹ Prueba de medias entre tipos de sal para la variable emergencia de brotes a 50 días (Pr > F = 0,0001)

² Prueba de medias entre concentraciones para la variable emergencia de brotes a 50 días (Pr > F = 0,002).

(*) Significancia (Tukey, 0,05). Nota: medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

de crecimiento que forma una papa pequeña. Por su parte, Moorby y Milthorpe (1983) indican que un déficit hídrico en las hojas de -500J·kg⁻¹ puede ser la causa de dicha disminución. El efecto también se asocia a temperaturas superiores a 30°C registradas en invernadero durante algunos días en las etapas de crecimiento vegetativo e inicio del tubérculo,

lo que provocó estrés hídrico entre riegos debido a evapotranspiración excesiva. Según Ku *et al.* (1977) y Prange *et al.* (1990) el estrés térmico e hídrico retrasan el desarrollo foliar de la papa y en consecuencia el crecimiento de los tubérculos disminuye.

Expansión foliar durante el crecimiento del tubérculo

Ochenta días después de la emergencia, en los tratamientos testigo, salinidad clorhídrico-sulfática, MgCl₂·6H₂O, salinidad sulfático-clorhídrica, MgSO₄·7H₂O y CaCl₂·2H₂O, se formaron un promedio de 17 hojas por planta, sin diferencia significativa entre ellos y sus concentraciones. Lo mismo ocurrió en los tratamientos Na₂SO₄ y NaCl hasta concentraciones de 6,40 y 2,48g·l⁻¹ respectivamente, donde el número de hojas disminuyó al aumentar la concentración. Los tratamientos NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica indujeron un evidente retraso en la formación del sistema foliar, ya que presentaron 16 y 14 hojas por planta a una concentración de 1,13g·l⁻¹, después de lo cual el número de hojas formadas disminuyó significativamente. El limitado desarrollo foliar de las plantas por estrés salino conlleva una disminución del área foliar, agudizada por el déficit hídrico que producen las sales en las hojas. De acuerdo a Strogonov (1964) tiene lugar una inhibición del crecimiento de células foliares que explica la escasa área desarrollada y su influencia en la reducción de azúcares translocados hacia los tubérculos. La disminución del área foliar fue notable en las plantas sometidas a más de 2,48g·l⁻¹ de NaHCO₃ y más de 3,84g·l⁻¹ de salinidad sulfático-sódica, al crecer plantas raquílicas con hojas pequeñas, lo que se considera una tendencia al haloxerismo (Strogonov, 1964).

Al final de la etapa de crecimiento, las plantas de los otros tratamientos tuvieron un número de hojas homogéneo.

Senescencia foliar

Las plantas sometidas a sales no bicarbonatadas sódicas, en todas las concentraciones,

nes, presentaron senescencia foliar ~85 días después de la emergencia. En contraste, las crecidas en soluciones de NaHCO_3 y salinidad sulfático-sódica en el intervalo 2,48-9,60g·l⁻¹ exhibieron senescencia 100 días después de la emergencia. Las sales y tipos de salinidad produjeron un retardo diferencial de la expansión foliar, más notable en las plantas crecidas en soluciones sódico-alcalinas. El retraso es secuela del retardo en emergencia de brotes, que prolongó el periodo de formación de hojas y provocó envejecimiento prematuro del sistema foliar en la etapa de crecimiento de tubérculos, la cual se acortó debido a la muerte fisiológica del sistema foliar, limitando el crecimiento de los órganos demanda.

Longitud del tallo

La tasa de incremento en longitud del tallo 20-50 días después de la emergencia aumentó al incrementar la concentración salina en las plantas sometidas a NaCl , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, salinidad sulfático-clorhídrica y clorhídrico-sulfática al pasar de 0 a 9,60g·l⁻¹ (Tabla III). El comportamiento se atribuye a un crecimiento rápido poco sostenido observado en plantas jóvenes de muchas glófitas tales como fríjol, tomate y algodón, mediante el cual evaden el estrés salino temporalmente (Strogonov 1964; Poljakoff y Lerner 1994). En plantas de papa sometidas a NaHCO_3 y salinidad sulfático-sódica esta tasa también aumenta en el primer caso hasta una concentración de 2,48g·l⁻¹ y en el segundo hasta 3,84g l⁻¹, después de las cuales disminuye en forma notable a 9,60g·l⁻¹. De 50-80 días después de la emergencia, las plantas sometidas a NaCl , NaHCO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y salinidad sulfático-sódica disminuyeron la tasa de extensión conforme aumentó el nivel salino, en tanto que en los tratamientos $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4 , salinidad sulfático-clorhídrica y salinidad clorhídrico-sulfática las plantas mantuvieron una tasa similar a la del testigo, induciendo que en

TABLA II
EFECTO DE LAS SALES Y SU CONCENTRACIÓN EN EL PROMEDIO DE NÚMERO DE HOJAS Y ÁREA FOLIAR POR PLANTA DE PAPA, DIVERSOS DÍAS DESPUÉS DE LA EMERGENCIA

Tratamiento	Concentración g L ⁻¹	Número de hojas			Área foliar (cm ²)		Índice de Área foliar	
		20 DDE ¹ 4	50 DDE 5	80 DDE 6	50 DDE 7	80 DDE 8	IAF 50 DDE	IAF 80 DDE
Testigo	0,00	8a	12a	17 a	23,35	17,23 a	1,22	0,9
I, (NaCl)	1,13	8a	11a	15 ba	16,3	17,60 a	1,02	0,92
BA ¹ , A ² , A ³ , BAC ⁷	2,48	8 ba	11a	15 ba	13,88	18,83 a	0,86	0,99
	3,84	6 bac	11 ba	14 ba	20,78	19,05 a	1,09	1,00
	5,19	6 bac	10 ba	14 ba	29,16	18,46 a	1,53	0,97
	6,4	2 bc*	9 ba	13 b*	25,01	20,41 a	1,31	1,07
	9,6	0 c*	9 b*	13 b*	28,18	22,10 a	1,48	1,16
II, (NaHCO ₃)	1,13	7a	11a	14 ba	19,21	17,33 a	1,01	0,91
C ^{1*} , B ^{2*} , C ^{3*} , BC ^{7*}	2,48	2 ba	10a	13 ba	29	19,19 a	1,52	1,01
	3,84	0 bac	7 ba	10 ba	19,16	14,96 a	1	0,78
	5,19	0 bac	7 ba	9 ba	16,44	11,26 a	0,86	0,66
	6,4	0 bc*	2 ba	5 b*	13,58	12,72 a	0,67	0,66
	9,6	0 c*	2 b*	4 b*	10,5	10,50 a	0,55	0,55
III, (Na ₂ SO ₄)	1,13	8a	12a	16 ba	21,45	17,80 a	1,12	0,93
BA ¹ , A ² , BA ³ , A ⁷	2,48	8 ba	11a	15 ba	21,87	20,94 a	1,15	1,1
	3,84	7 bac	11 ba	15 ba	26,63	23,81 a	1,4	1,25
	5,19	7 bac	11 ba	15 ba	26,81	22,36 a	1,41	1,17
	6,4	4 bc*	11 ba	15 b*	31,52	29,49 a	1,65	1,55
	9,6	2 c*	9 b*	14 b*	30,5	28,96 a	1,6	1,52
IV, CaCl ₂ ·2H ₂ O	1,13	8a	12a	15 ba	28,47	13,26 a	1,49	0,69
A ¹ , A ² , A ³ , C ^{7*}	2,48	8 ba	12a	15 ba	31,39	8,76 a	1,65	0,46
	3,84	8 bac	12 ba	16 ba	33,08	11,24 a	1,74	0,59
	5,19	8 bac	12 ba	16 ba	48,48	9,07 a	2,42	0,47
	6,4	7 bc*	12 ba	16 b*	37,44	9,33 a	1,87	0,49
	9,6	7 c*	11 b*	16 b*	35,66	8,48 a	1,78	0,44
V, MgCl ₂ ·6H ₂ O	1,13	8a	12a	17 ba	24,44	17,35 a	1,28	0,91
BA ¹ , A ² , A ³ , A ⁷	2,48	7 ba	12a	17 ba	28,44	16,35 a	1,49	0,86
	3,84	7 bac	12 ba	16 ba	24,57	19,82 a	1,29	1,04
	5,19	7 bac	12 ba	16 ba	23,24	22,70 a	1,22	1,19
	6,4	6 bc*	12 ba	16 b*	24,97	22,16 a	1,31	1,16
	9,6	5 c*	12 b*	16 b*	25,26	24,77 a	1,34	1,3
VI, MgSO ₄ ·7H ₂ O	1,13	8a	12a	15 ba	25,25	17,78 a	1,28	0,93
A ¹ , A ² , A ³	2,48	8 ba	12a	15 ba	20,61	14,48 a	1,08	0,76
	3,84	8 bac	12 ba	17 ba	24,83	22,79 a	1,3	1,19
	5,19	7 bac	12 ba	16 ba	24,29	31,30 a	1,27	1,64
	6,4	7 bc*	12 ba	17 b*	24,43	27,52 a	1,28	1,44
	9,6	5 c*	13 b*	17 b*	28,8	31,69 a	1,51	1,66
VII, Sulfático- A ¹ , A ² , A ³ , BA ⁷	1,13	9a	13 a	17 ba	29,62	19,77 a	1,55	1,04
	2,48	8 ba	13 a	16 ba	31,06	25,23 a	1,63	1,32
	3,84	7 bac	13 ba	17 ba	26,46	19,56 a	1,39	1,03
	5,19	8 bac	12 ba	16 ba	21,12	16,22 a	1,11	0,85
	6,4	7 bc*	12 ba	16 b*	23,48	19,36 a	1,23	1,01
	9,6	6 c*	12 b*	16 b*	21,02	19,43 a	1,1	1,02
VIII, Clorhídrico- sulfática	1,13	9a	13 a	17 ba	35,9	15,54 a	1,88	0,97
A ¹ , A ² , A ³ , BAC ⁷	2,48	8 ba	13 a	17 ba	45,56	15,04 a	2,39	0,94
	3,84	8 bac	12 ba	16 ba	31,87	17,62 a	1,67	0,92
	5,19	8 bac	12 ba	16 ba	30,44	15,60 a	1,6	0,97
	6,4	7 bc*	12 ba	16 b*	28,07	19,58 a	1,47	1,03
	9,6	7 c*	11 b*	17 b*	20	24,09 a	1,05	1,26
IX, Sulfático- sódica	1,13	8a	13 a	16 ba	21,9	20,27 a	1,15	1,06
BC ^{1*} , A ² , BC ^{3*} , BAC ⁷	2,48	7 ba	12a	15 ba	26,45	21,36 a	1,39	1,12
	3,84	2 bac	11 ba	12 ba	20,91	17,13 a	1,1	0,9
	5,19	2 bac	10 ba	12 ba	18,89	16,76 a	0,94	0,88
	6,4	2 bc*	8 ba	10 b*	19,97	14,17 a	0,99	0,74
	9,6	1 c*	6 b*	9 b*	16,84	6,98 a	0,84	0,34

¹Donde: DDE = Días después de emergencia,

A, B, C, BA, BAC, BC = Prueba de medias entre tipos de sal y las variables: ¹No. de hojas 20 DDE (Pr>F = 0,0001);

²No. de hojas 50 DDE (Pr>F = 0,0001); ³No. de hojas 80 DDE (Pr>F = 0,0001) y ⁷Área foliar 80 DDE (Pr>F = 0,001).

a, b, ba: Prueba de medias entre concentraciones y las variables ⁴No. de hojas 20 DDE (Pr>F = 0 0001);

⁵No. de hojas 50 DDE (Pr>F = 0,0002); ⁶No. de hojas 80 DDE (Pr>F = 0,004) y ⁸Área foliar 80 DDE (Pr>F = 0,8336).

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. (*) Significancia estadística (Tukey, 0,05).

estos tratamientos el crecimiento final del tallo no fue muy afectado por estas sales. En contraste, el crecimiento es afectado significativamente al aumentar la concentración de NaHCO_3 y la salinidad sulfático-sódica, en tanto que lo es moderadamente por $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y NaCl , de tal manera que la toxicidad de las tres primeras sales y el efecto osmótico de la

longitud de la raíz hasta concentraciones de 3,84 y 5,19g·l⁻¹ respectivamente, para después incrementar su longitud hasta 9,60g·l⁻¹. Esta tendencia de la raíz a aumentar su longitud en altas concentraciones de sales es un mecanismo para evadir el estrés, localizando espesores menos salinos, comportamiento observado en raíces de algodón sometidas a

última disminuyen el crecimiento del tallo, tal y como sucede con otros órganos vegetales (Flowers, 1999).

El decremento de la tasa de longitud del tallo es la suma de la inhibición del crecimiento por la salinidad desde los primeros estadios, y es precondición para que la arquitectura vegetal sufra cambios evidentes (formación de un menor número de hojas y disminución del área foliar), todo lo cual limita el crecimiento de los tubérculos. Es notable que aún en los tratamientos con más incremento en la tasa de longitud del tallo, los valores son menores a los reportados por Mora (2004) para papa cv. Alpha en condiciones de temporal (0,79cm por día con una longitud del tallo de 45cm). Aunado al efecto salino también pudo intervenir la madurez fisiológica de la semilla; al respecto Moorby y Milthorpe (1983) indican que tubérculos semilla con largos periodos de almacenamiento tienden a formar plantas de porte menor al normal.

Longitud de la raíz

El crecimiento de la raíz de la planta disminuye entre la etapa de expansión del tubérculo y la maduración del mismo, lo que ocurre 40-50 días después de la emergencia (Rousselle, 1996). Las sales NaCl y Na_2SO_4 tienden a disminuir

Na₂SO₄ (Strogonov, 1964) y en raíces de fríjol, maíz y algodón en condiciones de salinidad con NaCl (Poljakoff y Lerner; 1994; Kafkafi y Bernstein, 1996). El resto de los tratamientos disminuyó la longitud de la raíz respecto del testigo (en porcentaje) al aumentar la concentración salina, en el orden NaHCO₃ (68,43)> salinidad sulfático-sódica (67,02)> MgSO₄·7H₂O (19,29)> MgCl₂·6H₂O (16,25)> CaCl₂·2H₂O (13,33)> salinidad clorhídrico-sulfática (10,52)> salinidad sulfático-clorhídrica (9,12)> NaCl= Na₂SO₄ (1,75%). CaCl₂·2H₂O inhibió en menor grado la elongación de la raíz por su carácter neutro y el aporte de Ca a la planta de papa, alto demandante de este elemento. El nivel salino que más favoreció el crecimiento de la raíz respecto del testigo, e incluso lo incrementó, fue el de 1,13g·l⁻¹ en los tratamientos Na₂SO₄, CaCl₂·2H₂O y salinidad sulfático-clorhídrica, lo que indica que la raíz de papa en los estadios superiores del crecimiento no tolera ningún tipo de sal o salinidad a altas concentraciones. Martínez *et al.* (1996) consideran a los órganos de la planta de papa como sensibles a la salinidad a partir de la etapa de crecimiento del tubérculo. Las sales sódico-alcalinas son con diferencia significativa, las que más inhibieron el crecimiento de la raíz; ya que sus procesos hidrolíticos y el Na⁺, actúan al nivel de meristemas destruyendo células vegetales e inhibiendo la síntesis de hormonas, lo que limita el crecimiento de la planta (Velásquez, 2002).

Acumulación de biomasa en la raíz, estolones y porción enterrada del tallo

En la Figura 1 se observa que las plantas de papa, en todos los tratamientos excepto en los de NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica, acumularon menos biomasa en la parte subterránea (~10-25% del total), lo que se atribuye a la disminución natural del crecimiento de la raíz al final del ciclo biológico de la planta (Mora, 2004), pero también al efecto salino. En el ejemplo es la disminución de

TABLA III
PROMEDIO DE ALTURA DE PLANTAS Y LONGITUD FINAL DE LA RAÍZ, EN FUNCIÓN DEL TIPO DE SAL Y CONCENTRACIÓN

Sal	Concentración g L ⁻¹	Altura de plantas			TIL Periodo (20 a 50 DDE) cm d ⁻¹	TIL Periodo (50 a 80 DDE) cm d ⁻¹	Longitud de la raíz
		20 DDE ¹ cm	50 DDE cm	80 DDE cm			
Testigo	0,00	13,20	20,50	38,00 a/2	0,24	0,58	28,50 a/4
NaCl	1,13	11,00	19,80	36,00 ba	0,29	0,54	27,00 a
BA ¹ , A ³	2,48	7,40	19,40	35,50 bac	0,40	0,53	27,10 a
	3,84	4,30	18,90	35,00 bac	0,48	0,52	26,00 ba
	5,19	4,10	18,50	32,50 bc*	0,48	0,43	26,50 bc*
	6,40	2,80	18,00	28,00 dc*	0,50	0,31	27,70 bc*
	9,60	0,50	17,70	27,50 c*	0,57	0,31	28,00 c*
NaHCO ₃	1,13	8,30	19,70	30,50 ba	0,38	0,36	26,00 a
C ^{1*} , B ^{3*}	2,48	1,50	16,00	25,00 bac	0,45	0,30	23,30 a
	3,84	0,00	13,10	20,50 bac	0,43	0,24	19,70 ba
	5,19	0,00	6,90	13,00 bc*	0,23	0,20	15,50 bc*
	6,40	0,00	3,95	10,20 dc*	0,13	0,20	12,90 bc*
	9,60	0,00	0,40	5,40 d*	0,13	0,16	9,00 c*
Na ₂ SO ₄	1,13	3,00	19,50	37,00 ba	0,21	0,60	28,80 a
A ¹ , A ³	2,48	11,00	18,60	36,40 bac	0,25	0,59	27,30 a
	3,84	8,30	18,50	35,00 bac	0,34	0,55	25,40 ba
	5,19	6,40	17,50	34,00 bc*	0,37	0,55	25,00 bc*
	6,40	4,80	17,00	32,80 dc*	0,40	0,52	26,80 bc*
	9,60	1,80	16,40	30,00 d*	0,48	0,45	28,00 c*
CaCl ₂ ·2H ₂ O	1,13	12,70	20,20	38,00 ba	0,25	0,59	29,00 a
A ¹ , A ³	2,48	11,90	19,35	36,50 bac	0,24	0,57	28,40 a
	3,84	11,50	19,00	36,00 bac	0,25	0,56	27,10 ba
	5,19	10,10	19,00	36,00 bc*	0,29	0,56	26,90 bc*
	6,40	9,40	18,40	35,50 cd*	0,30	0,57	25,00 bc*
	9,60	8,90	18,00	34,00 d*	0,30	0,53	24,70 c*
MgCl ₂ ·6H ₂ O	1,13	12,80	21,40	39,00 ba	0,28	0,58	27,90 a
A ¹ , A ³	2,48	10,90	22,00	38,00 bac	0,37	0,53	28,20 a
	3,84	10,30	21,80	37,50 bac	0,38	0,52	27,00 ba
	5,19	8,50	20,00	37,00 bc*	0,38	0,56	25,40 bc*
	6,40	7,70	20,00	37,00 dc*	0,41	0,56	26,60 bc*
	9,60	5,10	19,00	36,00 d*	0,46	0,56	23,70 c*
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1,13	13,1	23,7	39,00 ba	0,35	0,51	28,70 a
A ¹ , A ³	2,48	12,8	23,3	36,00 bac	0,35	0,42	26,30 a
	3,84	10,7	21,5	35,20 bac	0,36	0,45	25,20 ba
	5,19	8,5	20,4	34,00 bc*	0,39	0,45	24,80 bc*
	6,40	6,6	20	32,00 dc*	0,44	0,40	24,50 b*
	9,60	5,3	19	30,00 c*	0,45	0,36	23,00 c*
Sulfático-clorhídrica	1,13	15,5	26	39,00 ba	0,35	0,43	29,00 a
A ¹ , A ³	2,48	12,7	25	39,00 bac	0,41	0,46	28,00 a
	3,84	11,1	24,5	38,50 bac	0,44	0,46	27,00 ba
	5,19	9,25	22,3	37,00 bc*	0,43	0,49	27,00 bc*
	6,40	8	21,7	36,00 dc*	0,45	0,47	26,30 bc*
	9,60	6,4	20,5	35,50 d*	0,47	0,50	25,90 c*
Clorhídrico-sulfática	1,13	15,2	24,6	39,50 ba	0,31	0,49	28,50 a
A ¹ , A ³	2,48	12,75	24	39,00 bac	0,37	0,50	27,30 a
	3,84	10,75	22,75	38,00 bac	0,40	0,50	27,00 ba
	5,19	10	22	38,00 bc*	0,40	0,53	26,40 bc*
	6,40	8,9	20	37,50 dc*	0,37	0,58	26,20 bc*
	9,60	6,3	18,4	36,00 d*	0,40	0,58	25,50 c*
Sulfático-sódica	1,13	15,2	24,6	39,50 ba	0,31	0,49	28,50 a
BA ^{1*} , B ^{3*}	2,48	12,75	24	39,00 bac	0,37	0,50	27,30 a
	3,84	10,75	22,75	38,00 bac	0,40	0,50	27,00 ba
	5,19	10	22	38,00 bc*	0,40	0,53	26,40 bc*
	6,40	8,9	20	37,50 dc*	0,37	0,58	26,20 bc*
	9,60	6,3	18,4	36,00 d*	0,40	0,58	25,50 c*

¹DDE = Días después de emergencia, A, B, C, BA = Prueba de medias entre tipos de sal para las variables:

¹ longitud final del tallo (Pr>F = 0,0001); ² longitud final del tallo (Pr > F = 0,0001) y

³ longitud final de raíz (Pr>F = 0,0001).

ba, bac, bc, dc y d: Prueba de medias entre concentraciones para la variable

⁴ longitud final de raíz (Pr>F = 0,0001).

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes.

(*) Significancia estadística (Tukey, 0,05).

de biomasa en la parte subterránea de plantas sometidas a CaCl₂·2H₂O a más de 3,84g·l⁻¹,

bajo peso seco y la necrosis observada en los tubérculos se atribuyen a toxicidad (Gur-

atribuido al carácter neutro de dicha sal, la cual no produce estrés hídrico. En el segundo caso, la translocación de fotosintatos hacia otros órganos de la planta en crecimiento, en especial hacia los tubérculos, varía en función del efecto de las sales y su concentración; por ejemplo, las plantas sometidas a NaCl, Na₂SO₄, MgSO₄·7H₂O, salinidad sulfático-clorhídrica, MgCl₂·6H₂O y salinidad clorhídrico-sulfática registraron incrementos de biomasa de órganos subterráneos con relación al testigo, en el orden de 56,35; 54,14; 38,12; 28,72 y 13,25%, respectivamente. Las concentraciones a las que se registraron máximos de acumulación de biomasa fueron de 5,19g·l⁻¹ para las plantas sometidas a NaCl y MgSO₄·7H₂O; 6,40g·l⁻¹ para las crecidas en Na₂SO₄ y salinidad clorhídrico-sulfática; y 2,48g·l⁻¹ para las desarrolladas en MgCl₂·6H₂O y salinidad sulfático-clorhídrica. Al respecto, Mohammed y Sen (1990) indican que el incremento de biomasa a altas concentraciones salinas favorece la elongación de la raíz para evadir el estrés.

Las raíces también almacenan biomasa convirtiéndose en órganos de reserva, inhibiendo su crecimiento a causa de la quiescencia provocada por las condiciones salinas, que puede ser el caso de las plantas de papa sometidas a MgSO₄·7H₂O, salinidad sulfático-clorhídrica, MgCl₂·6H₂O y salinidad clorhídrico-sulfática. Las plantas sometidas a NaHCO₃ de 3,84 a 9,60g·l⁻¹ registraron la disminución más pronunciada de biomasa en órganos subterráneos. La escasa longitud de la raíz, su

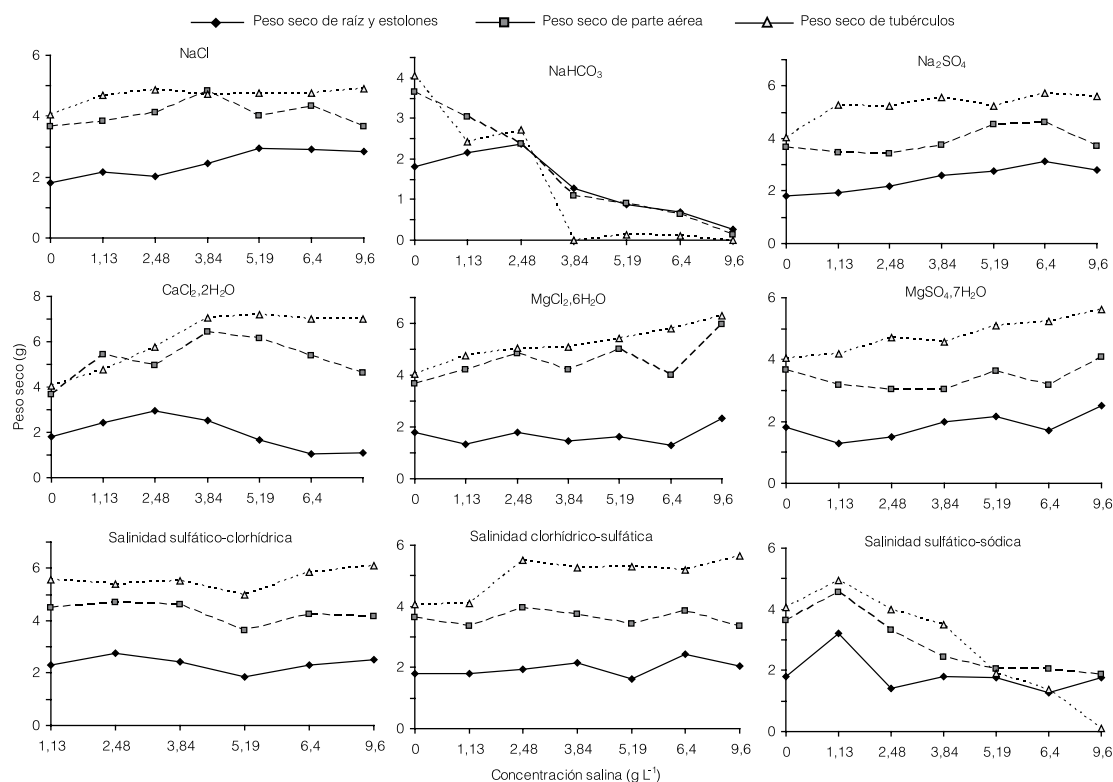


Figura 1. Efecto de la concentración de soluciones de sales puras y salinidades cualitativas en la acumulación proporcional de biomasa de la parte subterránea, parte aérea y tubérculos de plantas de papa cv. Alpha (determinaciones efectuadas 100 días después de la siembra).

minski *et al.*, 1977). Un comportamiento similar pero atenuado se registró en las plantas sometidas a salinidad sulfático-sódica. La inhibición de la expansión y elongación radical por estrés salino ha sido explicada por Strogonov (1964) y por Kafkafi y Bernstein (1996).

Acumulación de biomasa en la parte aérea

Con excepción de aquellas sometidas a NaHCO_3 , las plantas registraron una mayor acumulación proporcional de biomasa en la parte aérea que en la parte subterránea (Figura 1), generalmente del orden de 30-40% del peso seco total, variable en función del tipo de sal y la concentración. El $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ aumentó el porcentaje de biomasa acumulada en la parte aérea de las plantas de papa en 6,30% de 0 a $9,60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, y el resto de los tratamientos disminuyó ese porcentaje en este orden: salinidad clorhídrico-sulfática (20,68), Na_2SO_4 (20,27), NaCl (15,75), salinidad sulfático-clorhídrica (15,05), $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (12,74), y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (5,49%). Aún y cuando no hay diferencias estadísticas entre estos tratamientos y los de NaHCO_3 y salinidad sulfático-sódica, las plantas en estas últimas registraron los menores promedios de peso seco en la parte aérea a partir de $3,84 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$. En condiciones de temporal, el peso seco de la parte aérea de plantas de papa variedad Alpha, es de 35-40g por planta (Mora, 2004), de manera que la biomasa acumulada

en la parte aérea de las plantas en los tratamientos más sobresalientes representa solo un 10% del total producido en seco. En las condiciones experimentadas, la planta de papa disminuye drásticamente su producción de biomasa en la parte aérea, lo que explica la reducción en la altura y en el número de hojas producidas y, en consecuencia, la formación de tubérculos pequeños. Para Beringer *et al.* (1990) el fenómeno se debe a que la salinidad afecta el tamaño de la fuente y su actividad, al disminuir la producción de biomasa destinada a satisfacer la demanda de los tubérculos, que en consecuencia tienen un crecimiento limitado. En los tratamientos salinos no sódicos, la acumulación de biomasa en la parte aérea fue menor que en los tubérculos, lo que indica translocación de fotosintatos hacia éstos, mientras que en NaHCO_3 y salinidad sulfático-sódica, las plantas dejaron de formar tubérculos a $3,84$ y $5,19 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, lo que demuestra su efecto inhibitorio.

Acumulación de biomasa en los tubérculos

En todos los tratamientos excepto en NaHCO_3 y salinidad sulfático-sódica, la acumulación de biomasa en los tubérculos fue 40-50% del total, dependiendo del tipo de sal y la concentración. El orden de incremento de dicho porcentaje en el intervalo $0-9,60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ es $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (29,86) > salinidad clorhídrico-sulfática (19,84) > salinidad sulfá-

tico-clorhídrica (12,25) > Na_2SO_4 (8,73) > $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (7,96) > $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (1,45) > NaCl (1,03%). Los tratamientos salinidad sulfático-sódica y NaHCO_3 disminuyeron 94,36 y 100% dicha acumulación en el mismo intervalo, registrando el último tratamiento diferencia mínima significativa respecto de los demás. Las concentraciones ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) que más favorecieron la acumulación de biomasa fueron 1,13 para NaHCO_3 y Na_2SO_4 ; 2,8 para NaCl y salinidad sulfático-sódica; 5,19 para salinidad clorhídrico-sulfática; 6,40 para $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; y 9,60 para $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y salinidad sulfático-clorhídrica. Los pesos secos de tubérculos de cada tratamiento son muy bajos comparados con los de tubérculos comerciales de esta variedad (>80g). Los efectos de las sales y salinidades experimentales en la acumulación de biomasa de los tubérculos son:

1- La generación de una papa pequeña debido a una tuberización tardía vinculada a bajos valores de índices de área foliar, por retardo en el crecimiento tanto en la etapa vegetativa como en las subsiguientes etapas, así como a una senescencia precoz. Para Moorby y Milthorpe (1983) la formación de plantas de porte medio con un sistema foliar poco desarrollado influye en el insuficiente suministro de carbohidratos destinados a la expansión de los tubérculos iniciados, que en consecuencia acumulan pequeñas cantidades de biomasa. Strogonov (1964) atribuye tal reducción del crecimiento al estrés salino, fundamentalmente por inhibición del flujo de carbohidratos y sustancias nitrogenadas hacia los tubérculos.

2) La inducción de crecimiento secundario en cadena. Bajo condiciones salinas los tubérculos iniciados retienen su crecimiento y al darse las condiciones para reanudar, el crecimiento ya no continúa en el mismo tubérculo sino que otro tubérculo se inicia en la yema axilar contigua del estolón y así sucesivamente, de tal forma que la periodicidad del crecimiento por estrés salino, origina un gran número de tubérculos con escasa biomasa acumulada. La tuberización tardía es común en tubérculos madre avejentados, mientras que el crecimiento secundario es propio de condiciones de estrés hídrico, donde el riego fomenta periodos de crecimiento (Moorby y Milthorpe, 1983).

TABLA IV
MODELOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL PESO SECO TOTAL DE PLANTAS DE PAPA, EN FUNCIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DE LAS DIFERENTES SOLUCIONES SALINAS

Sales	Ecuación	R	R ²	CV
NaCl	PST (g) = 11,11 + (0,050)CE	0,46	0,21	4,43
NaHCO ₃	PST (g) = 7,94 + (-0,59)CE	-0,87	0,75	89,81
Na ₂ SO ₄	PST (g) = 10,82 + (0,14)CE	0,66	0,43	8,72
CaCl ₂ ·2H ₂ O	PST (g) = 14,18 + (-0,03)CE	-0,13	0,17	9,83
MgCl ₂ ·6H ₂ O	PST (g) = 9,71 + (0,26)CE	0,83	0,68	1,11
MgSO ₄ ·7H ₂ O	PST (g) = 8,14 + (0,25)CE	0,96	0,92	12,29
Salinidad sulfático-clorhídrica	PST (g) = 12,24 + (-6,35x10 ⁻⁴)CE	-3,40	11,56	7,19
Salinidad clorhídrico-sulfática	PST (g) = 10,15 + (0,08)CE	0,47	0,22	7,85
Salinidad sulfático-sódica	PST (g) = 11,97 + (-0,63)CE	-0,92	0,85	0,45

Los modelos de calibración presentados en la Tabla IV predicen que en los tratamientos CaCl₂·2H₂O y salinidad sulfático-clorhídrica el aumento de la CE no disminuye el peso seco total de las plantas respecto del testigo, pero tampoco lo incrementa. En esos tratamientos las plantas acumularon la mayor cantidad de biomasa total, lo que indica que el crecimiento fue menos afectado por estas sales. No sucede lo mismo con los tratamientos Na₂SO₄, MgCl₂·6H₂O, NaCl, salinidad sulfático-clorhídrica y MgSO₄·7H₂O, cuyas plantas, en ese orden, incrementan el peso seco total al aumentar la conductividad eléctrica; sin embargo, dicho aumento no fue superior al de los dos tratamientos señalados en primer término. En contraste, las plantas de los tratamientos NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica, disminuyen su peso seco total al aumentar la conductividad eléctrica.

Efecto del potencial osmótico en la biomasa total

El potencial osmótico de cada solución redujo la biomasa total de las plantas de papa. Por ejemplo, al cote-

salinidad sulfático-clorhídrica produjeron la mayor disminución de potenciales osmóticos, entre -0,67 y -0,50MPa respectivamente; sin embargo, no redujeron el promedio de peso seco de plantas, comparada con la reducción producida por las sales bicarbonatadas sódicas. El resto de las sales produjo un comportamiento intermedio. En general, la inhibición obedece al efecto osmótico de NaCl, salinidad sulfático-clorhídrica, salinidad clorhídrico-sulfática, Na₂SO₄, MgCl₂·6H₂O y CaCl₂·2H₂O, y al efecto tóxico de MgSO₄·7H₂O. Al respecto Gorham (1996) indica que ante el estrés hídrico-salino, las plantas cierran sus estomas y realizan un uso eficiente de agua; sin embargo, el cierre estomático en plantas C3, como la papa, disminuye la producción fotosintética, lo que incide en una menor acumulación de biomasa de los órganos en crecimiento.

que la inducción de crecimiento secundario a causa del estrés salino y del riego, formó minitubérculos en cadena. El efecto de las sales sódico-alcalinas es el más drástico al inhibir la formación de tubérculos a elevadas concentraciones.

Los modelos de predicción del peso seco total de plantas en función de la conductividad eléctrica de las soluciones salinas indican que al aumentar este parámetro se inhibe la acumulación de biomasa de las plantas de papa. El efecto es más intenso en la salinidad sulfático-sódica y la sal NaHCO₃. Sin embargo, los pesos secos predichos de las plantas sometidas a MgSO₄·7H₂O, Na₂SO₄, MgCl₂·6H₂O, salinidad clorhídrico-sulfática y NaCl sobrevalúan los resultados experimentales, mientras que los pesos predichos de plantas sometidas a CaCl₂·2H₂O y salinidad sulfático-clorhídrica subevalúan los resultados.

La variación del potencial osmótico de las soluciones salinas permite distinguir a NaHCO₃ y a la salinidad sulfático-sódica, como las que más inhiben la acumulación de biomasa de plantas de papa debido a su efecto osmótico-tóxico; en tanto que esta inhibición se debe al efecto osmótico de NaCl, salinidad sulfático-clorhídrica, salinidad clorhídrico-sulfática, Na₂SO₄, MgCl₂·6H₂O y CaCl₂·2H₂O, y al efecto tóxico de MgSO₄·7H₂O.

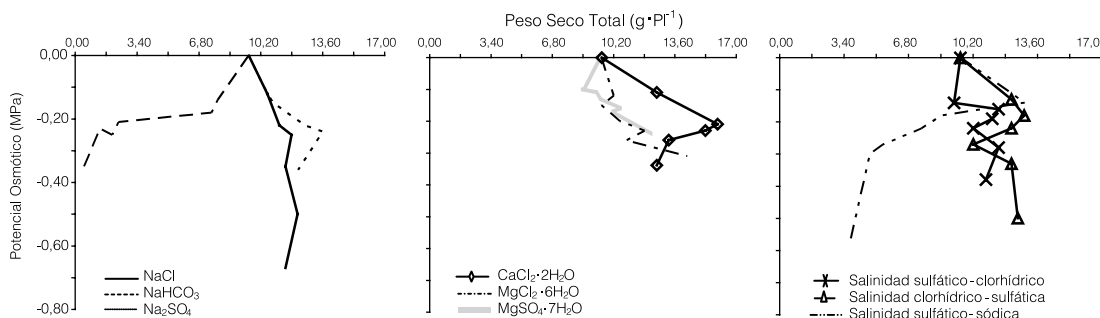


Figura 2. Efecto del potencial osmótico de soluciones en (a) y (b) sales puras y (c) tipos de salinidad en la acumulación de biomasa total de las plantas de papa.

jar los potenciales osmóticos de las sales y salinidades en cada nivel de concentración con los pesos secos por planta (Figura 2) se determinó que al pasar de 0 a 9,60g·l⁻¹ los tratamientos NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica son los que más redujeron el promedio de peso seco total de plantas, con valores del orden de 0,39g·l⁻¹ el primero y de 3,74g·l⁻¹ el segundo, y osmóticos en la solución de -0,56 y -0,38MPa, respectivamente. Su efecto tóxico-osmótico influyó en los bajos valores de biomasa total acumulada. En contraste, las soluciones de NaCl y

Efecto de las sales en el número y diámetro de tubérculos

La inhibición del crecimiento de plantas de papa por estrés salino produjo gran número de tubérculos de diámetro pequeño (1,5-4,5cm). Incluso, en NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica a concentraciones >3,84g·l⁻¹, las plantas dejaron de formarlos. Similares resultados fueron obtenidos por Paliwal y Yadav (1980), Levy (1992) y Nadler y Heuer (1998), quienes experimentaron con soluciones de NaCl, CaCl₂·2H₂O y NaHCO₃ a diversas concentraciones.

REFERENCIAS

Aitken I (1977) Conceptos agronómicos y producción foliar. *Agrociencia* 28: 115-143.
 Beringer H, Koch K, Lindhauer MG (1990) Source: sink relationships in potato (*Solanum tuberosum*) as influenced by potassium chloride or potassium sulphate nutrition. En *Plant nutrition-physiology and applications*. Kluwer Academic Pres. Norwell, Massachusetts, EEUU. pp. 639-642.
 Bernstein L (1964) *Salt tolerance of plants*. Information Bulletin 283. US Department of Agriculture. Washington, DC, EEUU. 323 pp.

- Flowers JT (1999) Salinisation and horticultural production. *Sci. Hort.* 78: 1-4.
- Gorham J (1996) Mechanisms of salt tolerance of halophytes. En *Halophytes and Biosalines Agriculture*, Choukr-Allah R, Malcolm CV, Hamdy A. (Eds.) Marcel Decker Inc. Nueva York, EEUU. pp 31-53.
- Gurmiski S, Agustin D, Sulej J (1977) Comparison of some chemical and physico-chemical properties of natural and model sodium humates and of biological activity of both substances in tomato water cultures. *Acta Soc. Bot. Pol.* 14: 437-448.
- Hunt R (1982) *Plant Growth Curves*. Arnold. Londres, RU. 247 pp.
- Kafkafi U, Bernstein N (1996) Root growth under salinity stress. En *Plant Roots: The Hidden Half*, Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U, Bernstein N (Eds.). Dekker. Nueva York, EEUU. pp 435-451.
- Keenan W, Kleinfelter ChD, Wood HJ (1990) *Química General Universitaria*. Harper & Row; trad. A. Eroles Gómez. Continental. México. pp 222-252.
- Khurana SC, McLaren JS (1982) The influence of leaf area, light interception and season on potato growth and yield. *Potato Res.* 25: 329-342.
- Kovda VA (1977) Arid land irrigation and soil fertility. Problems of salinity, alkalinity and compactation. En *Arid Land Irrigation In Developing Countries*. Pergamon. Nueva York, EEUU. 211 pp.
- Ku S, Edwards GE, Tanner CB (1977) Effects of light, carbon dioxide and temperature on photosynthesis, oxygen, inhibition of photosynthesis and transpiration in *Solanum tuberosum*. *Plant Physiol.* 59: 868-872.
- Levy D (1992) The response of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) to salinity: plant growth and tuber yields in the arid desert of Israel. *Ann. Appl. Biol.* 120: 547-555.
- Maas EV, Hoffman GJ (1977) Crop salt tolerance current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* 103: 115-154.
- Martínez CA, Maestri M, Lani ER (1996) *In vitro* salt tolerance and proline accumulation in Andean potato (*Solanum spp.*) differing in frost resistance. *Plant Sci.* 116: 177-184.
- Mohammed S, Sen DN (1990) Germination behavior of some halophytes in Indian desert. *Ind. J. Expt. Biology* 28: 545-549.
- Moorby J, Milthorpe FL (1983) Papa. En Evans LT (Ed.) *Fisiología de los Cultivos*. 1ª ed.; trad. H. González Idiarte. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp 245-280.
- Mora-Aguilar R, Rodríguez-Pérez JE, Pena-Lomelí A, Campos-Ángeles DA (2004) Osmotic conditioning of potato (*Solanum tuberosum* L.) seed with saline solutions. *Rev. Chapingo, Ser. Hort.* 10: 15-21.
- Nadler A, Heuer B (1998) Physiological response of potato plants to soil salinity and water deficit. *Plant Sci.* 137: 43-51.
- Paliwal KV, Yadav VR (1980) Effect of saline irrigation water on the yield of potato. *Ind. J. Agric. Sci.* 50: 30-31.
- Poljakoff A, Lerner RH (1994) Plants in saline environments. En Pessaraki A (Ed.) *Handbook of Plant and Crop Stress*. Dekker. Nueva York, EEUU. pp 65-96.
- Prange RK, McRae KB, Midmore DJ, Peng R (1990) Reduction in potato growth at high temperature: role of photosynthesis and dark respiration. *Am. J. Bot.* 67: 357-359.
- Roussel P, Robert JC (1996) *La pomme de terre*. Institut National de la Recherche Agronomique. París Francia. pp. 25-154.
- Sánchez-Bernal E, Ortega-Escobar M, Hernández-González V, Ruelas-Ángeles G, Kohashi-Shibata J, García-Calderón N (2003) Tolerancia de Tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. *Terra* 21: 481-491.
- Steiner AA (1984) The universal nutrient solution. *Proc. 6th Intern. Congress on Soilless Culture*. International Society for Soilless Culture. pp. 634-649.
- Strogonov BP (1964) *Physiological basis of salt tolerance of plants. (As affected by various types of salinity)*. Academic of Sciences, USSR / Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel. 256 pp.
- Watson DJ (1947) Comparative physiological studies on the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Ann. Bot.* 11: 41-76.
- Velázquez MM, Ortega EM, Martínez GA, Kohashi SJ, García CN (2002) Relación funcional PSIRAS en las aguas residuales y suelos del Valle de Mezquital, Hidalgo. México. *Terra Latinoam.* 20: 459-464.

GROWTH OF POTATO PLANTS (*Solanum tuberosum* L.) CV. ALPHA INDUCED BY DIVERSE SALINITY SOLUTIONS

Edgar Sánchez-Bernal, Manuel Ortega Escobar, Víctor González-Hernández, Marco Camacho-Escobar and Josué Kohashi-Shibata

SUMMARY

The growth of potato plants (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha was studied in stress conditions induced by salts (NaCl , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) and by sulphatic-chlorhidric, chlorhidric-sulphatic and sulphatic-sodic salinities, in concentrations ranging from 0.00 to 9.60 g l^{-1} . Each salt and salinity produced a differential retardation in sprouts emergence, closely related with the sprouting percentage analyzed in a previous experiment. This retardation is due to 1) the osmotic effect of NaCl , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, sulphatic-chlorhidric salinity and chlorhidric-sulphatic salinity, and 2) the toxic effect of

$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 and sulphatic-sodic salinity. Both effects increase the dormancy period of the tubers, and generally the toxic effect of alkaline-sodic salts is more intense. The saline effect extended the phase of vegetative growth and retarded tuber initiation. The poor development of leaves in the tubers initiation period caused a slow rate of growth of the potato tubers and small potatoes were produced. The phenomenon was more pronounced in plants subjected to sulphatic-sodic salinity and NaHCO_3 in concentrations higher than 3.84 g l^{-1} , when dwarf plants and plants without tubers were produced.

CRECIMIENTO DE PLANTAS DE BATATA (*Solanum tuberosum* L.) CV. ALPHA, INDUCIDO POR DIVERSAS SOLUÇÕES SALINAS

Edgar Sánchez-Bernal, Manuel Ortega Escobar, Víctor González-Hernández, Marco Camacho-Escobar e Josué Kohashi-Shibata

RESUMO

Foi estudado, em vasos experimentais, o crescimento de plantas de batata (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, em condições de estresse inducido por sais de NaCl , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ e salinidades sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica, em concentrações de 0.00 a 9.60 g L^{-1} . Cada sal e tipo de salinidade produziu uma demora diferencial da emergência de rebentos ou brotos, em íntima relação com a sua percentagem de brotação, analisada na primeira fase experimental (Sánchez et al., 2003). Dita demora obedece a: 1) o efeito osmótico das sais NaCl , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, salinidades clorhídrico-sulfática e sulfático-clorhídrica, e 2) ao efeito

tóxico das sais $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 e á salinidade sulfático-sódica; ambos efeitos vão incrementar o período de quiescência dos tubérculos, tornando mais agudo o efeito tóxico das sais sódico-alcalinas. O estresse salino prolongou a duração das etapas de crescimento vegetativo, a de iniciação de tubérculos. O escaso desenvolvimento foliar no momento da iniciação dos tubérculos, deu origem a uma lenta taxa de crescimento dos mesmos, produzindo batata pequena; o fenómeno foi mais pronunciado nas plantas sometidas a salinidade sulfático-sódica e NaHCO_3 , em concentrações superiores a $3,84 \text{ g l}^{-1}$. aonde se formaram plantas com nanismo e ausência de tubérculos.