



Efecto del uso de agua residual tratada sobre el suelo y cultivos forrajeros de *Chenopodium quinoa* Willd y *Zea mays* L.



Ana Lilia Velasco-Cruz ^a

Vicente Arturo Velasco-Velasco ^{a*}

Judith Ruíz-Luna ^a

José Raymundo Enríquez-del Valle ^a

Aarón Martínez-Gutiérrez ^a

Karen del Carmen Guzmán-Sebastián ^a

^a Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. Nazareno, 71230, Xoxocotlán, Oaxaca, México.

*Autor de correspondencia: vicente.vv@voaxaca.tecnm.mx

Resumen:

Ante la escasez del recurso hídrico para el uso agrícola, es necesario promover el uso del agua residual para la agricultura. En las localidades Capulálpam de Méndez e Ixtlán de Juárez, Estado de Oaxaca cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de tipo anaerobio. Se evaluó el crecimiento morfológico, producción de biomasa y contenido de N y P en dos especies forrajeras: *Chenopodium quinoa* Willd y *Zea mays*, regados con agua residual tratada (ART). Se estableció un diseño completo aleatorio (DCA) en cada municipio, dada la homogeneidad del suelo. Con arreglo factorial 2 x 2, esto es, dos cultivos forrajeros (Quinoa y maíz), y dos tipos de riego (agua dulce y agua residual tratada), con 4 repeticiones por tratamiento. Se realizaron análisis de varianza y pruebas de media Tukey ($P \leq 0.05$) de las variables estudiadas. En los suelos el nivel de pH fue “moderadamente ácido” a “neutro” (5.1 a 7.3); la CE indicó “Efectos despreciables de la salinidad”; Materia orgánica en intervalos de “medio a alto”; y Textura Franco arcilloso arenoso en Ixtlán y Franco arcilloso en

Capulálpam. Las variables de crecimiento (altura de planta, diámetro de tallo y número de hojas) y biomasa fueron significativamente mayores en plantas regadas con agua residual tratada en ambos cultivos forrajeros. El contenido de nitrógeno y fósforo fue significativamente mayor en plantas de quinoa y maíz que recibieron ART. El ART podría ser una alternativa que ayude a disminuir el uso de fertilizantes químicos, al ser una fuente importante de nutrimentos en los cultivos forrajeros.

Palabras clave: Biomasa, Peso fresco, Peso seco, Tratamiento de agua.

Recibido: 16/05/2023

Aceptado: 10/08/2023

Introducción

En el mundo, más del 70 % de las extracciones de agua dulce o potable, están relacionadas con el sector agrícola⁽¹⁾, y en México es el 76 %. Parte de esto, aproximadamente el 29 % se utiliza para el crecimiento de cultivos forrajeros⁽²⁾, una de las especies más cultivadas es el maíz forrajero por el alto valor energético que aporta al ganado⁽³⁾ cuya función es generar proteínas para el consumo humano. El contenido de proteínas puede considerarse una unidad de medida valiosa para comparar alimentos⁽⁴⁾. Para superar el problema de escasez o falta de agua, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), ha estimado que al menos 20 millones de hectáreas de suelos agrícolas se riegan con aguas residuales no tratadas o parcialmente tratadas⁽⁵⁾. La tierra regada con aguas residuales representa, por lo tanto, el 10 % del total distribuida en cincuenta países en todo el mundo. La Organización Mundial de la Salud (OMS) y la FAO otorgan importancia al uso de aguas residuales tratadas (ART) en el riego agrícola, así como al cambio de agua dulce a aguas residuales tratadas o reutilizadas. Las ART contienen nutrientes esenciales para los cultivos, y con fines de riego, contrarrestan los riesgos ambientales y de salud^(5,6,7). Los forrajes son altamente demandantes de agua y son un producto de consumo no directo al ser humano. El uso de ART es una forma de garantizar agua para el futuro, es un proceso de sustentabilidad y un pequeño paso hacia la productividad de agroecosistemas locales. Por tal motivo es conveniente establecer cultivos forrajeros cercanos a los sitios donde se ubican las plantas de tratamiento de aguas residuales. La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) como forraje presenta ventajas al cultivarse desde el nivel del mar hasta los 4,000 m, tolera heladas y sequía, además de que se adapta en diferentes regiones con suelos ácidos y alcalinos (pH 4 a 9); su valor nutritivo radica en el balance ideal de los aminoácidos de su proteína que lo convierten en un componente ideal en las dietas⁽⁸⁾.

El maíz es el producto agrícola más cultivado en todo el mundo⁽⁹⁾. Para 2025, se estima que el valor destinado a la alimentación animal será del 60 % respecto al consumo mundial, y crecerá a una tasa anual promedio de 1.8 %, impulsado por la expansión del ganado en los países en desarrollo⁽¹⁰⁾. En México el maíz se utiliza como forraje, en grano, rastrojo, ensilaje e industrial (hojas para tamal) y es uno de los principales cultivos de regadío con aguas residuales no tratadas⁽¹¹⁾.

Para garantizar que las ART no pongan en riesgo al suelo, a los cultivos y a la salud humana, se recomienda que las aguas residuales hayan pasado por una planta de tratamiento^(12,13). Con el uso del ART en los cultivos se ahorrarán costos, se protegerán mantos acuíferos, y el agua dulce será aprovechable para la población. Por lo anterior, el presente estudio tuvo como finalidad evaluar el crecimiento morfológico, la producción de biomasa y el contenido de N y P en dos especies forrajeras: *Chenopodium quinoa* Willd y *Zea Mays*, regados con agua residual tratada (ART) en Ixtlán de Juárez y Capulálpam de Méndez, Oaxaca, México.

Material y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en la "Sierra Norte" de Oaxaca, México. ubicada en la subprovincia de la Sierra Madre del Sur de México, y en la región hidrológica RH28 "Papaloapan", la segunda cuenca hidrográfica más grande del país⁽¹⁴⁾. Las investigaciones se llevaron a cabo en las localidades de Ixtlán de Juárez y Capulálpam de Méndez. El municipio de Ixtlán de Juárez (17° 20' LN, 96° 29' LO), se encuentra a 2,030 m de altitud; el clima es C (w) templado subhúmedo y el área tiene orografía accidentada; la precipitación promedio es de 900 a 1,100 mm por año; la temperatura media anual es de 20 °C⁽¹⁵⁾; el tipo de suelo es Acrisol húmico (Ah). El municipio de Capulálpam de Méndez (17° 18' LN, 96° 27' LO) se encuentra a 2,040 m de altitud; el clima se clasifica como C (w2) (w) b (i ') g templado subhúmedo; la precipitación promedio es de 1,115 mm por año, y ocurre entre junio y octubre; la temperatura promedio anual es de 15.2 °C⁽¹⁶⁾; el tipo de suelo es cambisol.

Diseño experimental y siembra

Se utilizó un diseño completo aleatorio (DCA) en cada municipio (Ixtlán de Juárez y Capulálpam de Méndez). Los tratamientos se conformaron de un factorial 2 x 2, es decir, los dos cultivos forrajeros (*Chenopodium quinoa* Willd y *Zea Mays* L) y dos tipos de riego: agua dulce (AD) y agua residual tratada (ART), con cuatro repeticiones por tratamiento. El estudio se estableció en marzo del 2017. La parcela cultivada en Ixtlán se estableció en una superficie de 300 m² (20 x 15 m) dividida en cuatro secciones de 60 m² cada una (15 x 4 m), y una pendiente del 3 %. La superficie cultivada en Capulálpam fue de 400 m² (20 x 20 m) dividida

en cuatro subparcelas de 80 m², con pendiente del 1 %. La superficie cultivada tanto de Ixtlán como de Capulálpam se subdividieron en dos partes: en una primera subparcela se cultivó la quinoa, regadas con agua dulce (AD) y con agua residual tratada (ART); en la segunda sección se cultivó maíz, regadas de igual manera con agua residual tratada (ART) y agua dulce (AD). Siendo la división entre las subparcelas cinco surcos sin sembrar, para efectuar los tipos de riego. La tierra se preparó con tractor, la distancia entre surcos de ambos cultivos fue de 80 cm trazados en forma paralela a la pendiente. La quinoa variedad Ontifor se sembró manualmente en el fondo del surco en forma continua, a menos de 3.0 cm de profundidad aproximadamente, con una densidad aproximada de 450,000 plantas ha⁻¹(8,17). El maíz (*Zea mays* criollo) se sembró manualmente en el fondo del surco en forma continua para forraje, a 4.0 cm de profundidad aproximadamente, con una densidad de 60,000 plantas ha⁻¹.

Obtención de agua residual tratada (ART)

Las plantas tratadoras de agua residual PTAR reciben en su totalidad aguas de origen doméstico provenientes de las mismas localidades, en Ixtlán recibe un flujo de 3.3 L s⁻¹ y las de Capulálpam un flujo de 1.0 L s⁻¹. Las PTAR tienen un sistema de pretratamiento basado en rejillas de diferentes diámetros, que se ubican a la entrada del canal de recepción para retener desechos sólidos, como tapas de soda, cabello, madera, PET, etc. El agua pasa a través de la trampa de arena (canal de 3.0 m de longitud), donde tiene lugar el primer proceso de sedimentación de sólidos. El agua residual ingresa por gravedad a los biodigestores, cada gota tiene una caída libre de 3.10 m (aquí se asienta la mayor parte del lodo) y por flujo laminar, el agua llega al área de sedimentación tubular (tanque interno) y se eleva gradualmente hasta que se desborda al área del biodigestor (tanque externo). El área de biodigestores está compuesta de tejidos de polietileno para facilitar el alojamiento de bacterias anaerobias por lo que se les llama hospederos. Las bacterias forman gránulos generalmente en los vértices de los hospederos, y ellas se hacen cargo de la biodigestión de las aguas residuales, transformándolas en aguas residuales tratadas (biodigeridas). El proceso dura 14 h.

Obtención del agua dulce (AD)

En Capulálpam, el agua dulce o agua limpia se extrajo directamente de un pozo para conducirla hasta la parcela. En Ixtlán de Juárez, el agua dulce se obtuvo del sistema de agua potable. No se hicieron aplicaciones de fertilizantes sintéticos o sustancias para el control de plagas o enfermedades. Los cultivos se establecieron durante la estación seca siguiendo las Directrices y Recomendaciones para el Uso Seguro de las Aguas Residuales en la Agricultura indicadas por la Organización Mundial de la Salud⁽⁶⁾. Los riegos se efectuaron con mangueras de 2" de diámetro, inundando los surcos. Estos se efectuaron cada cinco días. Los riegos se realizaron al mismo tiempo, el agua dulce y el agua residual tratada.

Análisis de suelo

Se obtuvieron muestras de suelo en cada sitio de estudio para su análisis⁽¹⁸⁾. Se obtuvieron cuatro muestras de suelo en la etapa de inicio, cuatro en la etapa intermedia y cuatro al final de los cultivos, es decir un total de 12 muestras en la superficie cultivada de Ixtlán. De igual manera se obtuvo un total de 12 muestras de suelo en la superficie cultivada de Capulálpam. Las muestras de inicio se extrajeron antes de la siembra y riego, las muestras intermedias y final se obtuvieron a los 45 y 90 días posteriores, respectivamente. Se recolectaron 2 kg de cada muestra a 30 cm de profundidad de cada sitio. Se determinó el pH y conductividad eléctrica (CE) con un potenciómetro (Conductronic PC45), materia orgánica (método de Walkley y Black), textura (método de Bouyoucos), nitrógeno (por micro kjeldahl) y fósforo (método Bray y Kurtz 1), éste último a través de un espectrofotómetro UV-Vis (GBC CITRA10).

Medición de variables de crecimiento en plantas

Se seleccionaron al azar 10 plantas de Quinoa y 6 plantas de maíz por cada tratamiento de cada cultivo, debido a la facilidad de manejo de las plantas dado el tamaño de las mismas, descartando las plantas de las orillas. La altura se midió con un flexómetro desde el nivel del suelo hasta la última hoja principal; el diámetro del tallo se midió con un vernier a 3.0 cm del suelo; el número de hojas se contabilizó en cada planta. La lectura de variables se realizó a los 60 y 90 días en quinoa y maíz, respectivamente. Se cosechó a los 90 días para la obtención del forraje debido a que más del 50 % de las plantas ya no mostraban mayor crecimiento en altura y diámetro del tallo. Para contabilizar la biomasa, se realizó un muestreo destructivo de cuatro plantas en cada tratamiento y se separaron las hojas, tallos y raíces a los 90 días después de la siembra. La materia fresca se colocó en estufas con circulación de aire forzado a 65 °C hasta alcanzar peso constante. Se obtuvo el peso fresco y seco de cada planta. Se determinó el contenido de nitrógeno en un analizador orgánico elemental (Perkin Elmer, serie II, modelo 2400) y fósforo por el método vanadomolibdico en un espectrofotómetro UV-Vis (GBC, modelo CITRA10) (19).

Análisis estadístico

Se realizaron análisis de varianza y pruebas de media de Tukey ($P \leq 0.05$) a los datos obtenidos en campo de las variables estudiadas en el cultivo de quinoa y maíz. Se evaluó el efecto de los factores y tratamientos, en otras palabras, tipo de riego sobre ambos cultivos establecidos en cada sitio.

Resultados y discusión

Propiedades físicas y químicas del suelo

El pH que mostraron los suelos antes del establecimiento del cultivo fue “moderadamente ácido”, a saber, pH 5.1 - 6.5⁽¹⁹⁾; a los 45 y 90 días posteriores a la siembra, en algunos casos, el pH aumentó a un nivel “neutro” (pH 6.6 - 7.3), tal incremento de pH pudo deberse a que los nitratos se transforman a nitrógeno atmosférico (N₂)⁽²⁰⁾. Esta condición es contraria a otros estudios donde los suelos irrigados con aguas de tratamiento secundario muestran decremento del pH 8.2 - 7.6⁽²¹⁾ y 8.0 - 7.7⁽²²⁾. La conductividad eléctrica (CE) en los suelos antes de la siembra fue de 0.31 a 0.44 dS m⁻¹, que de acuerdo con la NOM-021-2000 se consideran como “efectos despreciables de la salinidad” (< 1.0 dS m⁻¹) tanto en los suelos de Ixtlán y Capulálpam^(23,24); a los 45 y 90 días después de la siembra, la CE aumentó principalmente cuando se regó con ART estando aún dentro de los “efectos despreciables de la salinidad”, y sólo dos muestras de suelo se incrementaron a 1.05 y 1.27 dS m⁻¹, este último valor catalogado como “muy ligeramente salino” (1.1 - 2.0 dS m⁻¹). Lo anterior pudo deberse a que los suelos retienen cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico (CEC), por el incremento de arcilla y materia orgánica⁽²⁵⁾. Por la misma razón, se observó un incremento de unas décimas en los suelos donde se regó con ART. Lo anterior confirmó lo hallado por otros investigadores, la CE del suelo aumentó cuando se aplicó riego con ART: 0.34 - 0.42 dS m⁻¹⁽²¹⁾ y 2.73 a 4.70 dS m⁻¹⁽²²⁾.

Similar tendencia se obtuvo con la materia orgánica en el suelo, en el muestreo inicial, los valores indicaron un contenido “medio” (1.6 - 3.5 %) a “alto” (3.6 - 6.0 %); posterior a la siembra y riegos (45 días) los porcentajes se incrementaron en ambos cultivos, estos se mantuvieron en los mismos intervalos “medio” y “alto”. Al respecto, algunos investigadores indican que las aguas residuales aportan materia orgánica al suelo contribuyendo a mantener la fertilidad^(24,26,27). Sin embargo, en la etapa final (90 días) el contenido de materia orgánica disminuyó. En general, las ART mejoran la fertilidad de los suelos al aportar nutrimentos y otras ventajas para los cultivos, por consiguiente, disminuyen el uso de fertilizantes químicos⁽²⁸⁾. Los suelos tienen una fertilidad media, capacidad media de erosión y capacidad media de mineralización de la materia orgánica, fáciles de manejar para el agricultor. La región donde se encuentran dichas localidades es de orografía accidentada.

Cuadro 1: Cuantificación de pH, conductividad eléctrica y materia orgánica en los suelos en función de la localidad, el cultivo, el tipo de agua de riego y el tiempo de muestreo

Parámetro	Tiempo de muestreo	Suelos de Ixtlán				Suelos de Capulálpam			
		Quínoa		Maíz		Quínoa		Maíz	
		AD	ART	AD	ART	AD	ART	AD	ART
pH	Inicial	5.39	5.38	5.33	5.43	5.40	5.65	5.23	5.35
	Intermedio	6.62	6.26	6.92	6.08	5.93	5.57	5.47	5.73
	Final	6.75	6.25	6.57	6.65	6.21	5.31	5.69	5.78
CE, dS m ⁻¹	Inicial	0.31	0.32	0.33	0.31	0.39	0.36	0.44	0.37
	Intermedio	0.57	0.71	0.68	0.74	0.49	1.05	0.47	0.58
	Final	0.56	0.77	0.84	0.7	0.46	1.27	0.39	0.51
Materia orgánica, %	Inicial	2.44	1.89	2.99	2.68	4.23	3.40	5.23	4.07
	Intermedio	2.79	2.85	4.31	4.52	3.65	2.94	4.70	3.59
	Final	2.22	3.52	2.41	3.00	3.42	1.90	3.30	3.93
Textura		Franco arcilloso arenoso				Franco arcilloso			

AD= agua dulce; ART= agua residual tratada; CE= conductividad eléctrica; Inicial=muestras antes de plantar; Intermedio= 45 días después de la siembra; Final= 90 días después de la siembra.

Crecimiento de las plantas

La quinoa, es un cultivo andino domesticado, pertenece a la familia Amaranthaceae, también es considerado como un forraje⁽²⁹⁾. El maíz pertenece a la familia Poaceae, cultivo con distintos usos y aprovechamiento como lo es el forraje para el ganado⁽³⁰⁾. El tipo de crecimiento y desarrollo vegetativo son distintas entre las dos especies forrajeras. Los análisis de varianza mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.01$) en el factor “tipo de agua”, para las variables altura, diámetro del tallo y número de hojas en las plantas de quinoa, a los 60 y 90 días después de la siembra; lo mismo ocurrió en las plantas de maíz a excepción de la variable número de hojas.

La altura de las plantas, el diámetro del tallo y el número de hojas de quinoa fue significativamente mayor ($P \leq 0.05$) cuando el riego fue con agua residual tratada a los 60 y 90 días después de la siembra (Cuadro 2). Resultados similares se presentaron en maíz (Cuadro 3), excepto el número de hojas, ya que no mostró diferencia significativa, lo que significa que, el número de hojas fue similar cuando se regaron con agua residual tratada y agua dulce. La altura de la planta fue significativamente mayor ($P \leq 0.05$) en plantas que recibieron agua residual tratada. Los resultados demuestran que el agua residual tratada ya no debe ser vista como un producto de desecho, sino como un recurso hídrico que mediante el tratamiento potencia su reuso productivo⁽¹²⁾.

Cuadro 2: Crecimiento de quinoa a los 60 y 90 días después de la siembra en dos localidades, irrigadas con agua dulce y agua residual tratada

Sitio	Tipo de agua	Altura	Dt	No.	Altura	Dt	No.
		(cm)	(cm)	hojas	(cm)	(cm)	hojas
		----- 60 días -----			----- 90 días -----		
Ixtlán	AD	73.52 ^b	0.44 ^b	59 ^b	136.92 ^b	0.60 ^b	80 ^b
	ART	125.73 ^a	0.75 ^a	92 ^a	175.5 ^a	0.94 ^a	113 ^a
Capulálpam	AD	29.15 ^c	0.35 ^b	48 ^b	57.61 ^c	0.44 ^c	62 ^b
	ART	117.42 ^a	0.87 ^a	113 ^a	143.75 ^b	0.95 ^a	123 ^a
	\bar{x} AD	51.34 ^b	0.40 ^b	54 ^b	97.27 ^b	0.77 ^b	71 ^b
	\bar{x} ART	121.58 ^a	0.81 ^a	103 ^a	159.63 ^a	0.95 ^a	118 ^a

AD= agua dulce; ART=agua residual tratada. Dt= diámetro de tallo.

^{acb} Valores con la misma letra dentro de cada columna y cada cultivo no son diferentes ($P \leq 0.05$).

Cuadro 3: Crecimiento de maíz a los 60 y 90 días después de la siembra en dos localidades, irrigadas con agua dulce y agua residual tratada

Sitio	Tipo de agua	Altura	Dt	No.	Altura	Dt	No.
		(cm)	(cm)	hojas	(cm)	(cm)	hojas
		----- 60 días -----			----- 90 días -----		
Ixtlán	AD	111.70 ^b	2.11 ^b	11 ^b	255.91 ^b	2.31 ^b	14 ^a
	ART	174.08 ^a	2.40 ^a	13 ^a	340.22 ^a	2.57 ^a	14 ^a
Capulálpam	AD	74.37 ^c	1.91 ^b	9 ^c	157.72 ^c	1.92 ^c	11 ^b
	ART	124.29 ^b	2.58 ^a	11 ^b	248.91 ^b	2.66 ^a	12 ^b
	\bar{x} AD	93.04 ^b	2.01 ^b	10 ^b	206.81 ^b	2.12 ^b	13 ^a
	\bar{x} ART	149.19 ^a	2.49 ^a	12 ^a	294.57 ^a	2.62 ^a	13 ^a

AD= agua dulce; ART=agua residual tratada. Dt= diámetro de tallo;

^{abc} Valores con la misma letra dentro de cada columna y cada cultivo no son diferentes ($P \leq 0.05$).

Biomasa

Los análisis de varianza mostraron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en el peso fresco y seco de la raíz, hoja y tallo cuando las plantas se regaron con agua dulce y agua residual tratada en quinoa y maíz estudiados. El peso fresco y seco obtenido en el cultivo de quinoa y maíz forrajero fue significativamente mayor (Tukey, $P \leq 0.05$) en las plantas regadas con agua residual tratada (Cuadro 4 y 5). El peso fresco y seco de los órganos de ambos cultivos fue: raíz < hojas < tallos. En quinoa, el total de hojas + tallos en peso fresco fue de 3.4 veces mayor cuando se aplicó riego con agua residual tratada, y 3.2 en peso seco. De igual forma en maíz fue de 2.3 y 2.6 veces mayor en peso fresco y peso seco, respectivamente, cuando se regó con agua residual tratada. Lo anterior quizás por el mayor contenido de nutrientes que aportó el ART, como lo señalan otras investigaciones^(26,31,32). En un estudio similar al presente, se detectó que el contenido de N en las hojas de maíz irrigado con ART aumentó

de 1 a 3 % respecto a los cultivos irrigados con agua del acuífero⁽³³⁾, y hubo un rendimiento de 2.58 t ha⁻¹ de maíz en la parcela irrigada con ART, mientras que en la parcela control fue de 1.61 t ha⁻¹⁽³⁴⁾.

Cuadro 4: Peso fresco y seco de Quinoa regadas con agua dulce y agua residual tratada en dos localidades

Sitio-Tipo de agua	Raíz		Hoja		Tallo	
	Fresco	Seco	Fresco	Seco	Fresco	Seco
----- g -----						
I-AD	4.60 ^b	0.58 ^b	15.77 ^c	2.10 ^b	25.80 ^c	6.35 ^b
I-ART	6.98 ^a	1.91 ^a	52.91 ^a	6.05 ^a	106.91 ^a	18.74 ^a
C-AD	1.77 ^c	0.73 ^b	12.80 ^c	1.92 ^b	15.30 ^c	3.04 ^b
C-ART	6.05 ^a	1.93 ^a	28.15 ^b	5.52 ^a	53.25 ^b	13.19 ^a
\bar{x} AD	3.19 ^b	0.66 ^b	14.29 ^b	2.01 ^b	20.55 ^b	4.70 ^b
\bar{x} ART	6.52 ^a	1.92 ^a	40.53 ^a	5.79 ^a	80.08 ^a	15.97 ^a

I=Ixtlán, C=Capulálpam, AD= agua dulce, ART=agua residual tratada. \bar{x} promedio.

^{abc} Valores con la misma letra dentro de cada columna no son significativamente diferentes ($P \leq 0.05$).

Cuadro 5: Peso fresco y seco de Maíz regadas con agua dulce y agua residual tratada en dos localidades

Sitio -Tipo de agua	Raíz		Hoja		Tallo	
	Fresco	Seco	Fresco	Seco	Fresco	Seco
----- g -----						
I-AD	28.92 ^a	4.25 ^b	133.75 ^b	25.75 ^b	406.30 ^b	42.25 ^b
I-ART	73.25 ^a	11.56 ^a	266.00 ^a	56.00 ^a	895.50 ^a	99.00 ^a
C-AD	32.85 ^a	6.82 ^b	119.00 ^b	22.75 ^b	381.50 ^b	29.75 ^b
C-ART	83.50 ^a	15.50 ^a	261.50 ^a	54.25 ^a	1056.30 ^a	111.00 ^a
\bar{x} AD	30.89 ^b	5.54 ^b	126.38 ^b	24.25 ^b	393.90 ^b	36.00 ^b
\bar{x} ART	79.31%	82.06%	85.95%	80.81%	77.17%	90.86%
	78.38 ^a	13.53 ^a	263.75 ^a	55.13 ^a	975.90 ^a	105.00 ^a
	70.55%	82.73%	78.33%	79.10%	80.06%	89.24%

I=Ixtlán, C=Capulálpam, AD= Agua dulce, ART=Agua residual tratada. \bar{x} = promedio.

^{ab} Valores con la misma letra dentro de cada columna no son diferentes ($P \leq 0.05$).

El contenido de agua fue significativamente mayor en las plantas de quinoa y maíz forrajero que fueron regadas con ART respecto de las plantas que fueron regadas con agua dulce (Cuadro 6); las hojas mostraron menores valores porcentuales de agua y significativamente mayor contenido de este elemento. En las plantas de maíz, el contenido de agua fluctuó entre el 80 al 90 %; en quinoa fue del 70 al 85 %, en función del órgano que se trate. Estos resultados expresan la influencia del ART en el contenido de agua.

Cuadro 6: Contenido de agua en las plantas de quinoa y maíz regadas con agua dulce y agua residual tratada en dos localidades

Sitio - Tipo de agua	Raíz		Hoja		Tallo	
	Quinoa	Maíz	Quinoa	Maíz	Quinoa	Maíz
	g					
I-AD	4.02 ^b	24.67 ^b	13.67 ^c	108.00 ^b	19.45 ^c	364.05 ^b
I-ART	5.07 ^a	61.69 ^a	46.86 ^a	210.00 ^a	88.17 ^a	796.50 ^a
C-AD	1.07 ^c	26.03 ^b	10.88 ^c	96.25 ^b	12.26 ^c	451.75 ^b
C-ART	4.12 ^b	68.00 ^a	22.63 ^b	207.25 ^a	40.06 ^b	945.30 ^a
\bar{x} AD	2.53 ^b	25.35 ^b	12.28 ^b	102.13 ^b	15.86 ^b	357.90 ^b
\bar{x} ART	4.60 ^a	64.85 ^a	31.75 ^a	208.63 ^a	64.12 ^a	870.90 ^a

I=Ixtlán, C=Capulálpam, AD= agua dulce, ART=agua residual tratada. \bar{x} = promedio.

^{abc} Valores con la misma letra dentro de cada columna no son diferentes ($P \leq 0.05$).

Contenido de N y P en las plantas

En general el contenido de nitrógeno y fósforo fue significativamente mayor en los órganos de las plantas de quinoa y maíz forrajero que recibieron ART, a excepción de algunos órganos en ambos cultivos (Cuadro 7). Investigaciones en frutales de cítricos⁽³⁵⁾ y hortalizas⁽³⁶⁾ reportan mayor concentración de N en las hojas y mayor crecimiento de los cultivos, debido a la mayor cantidad de nutrimentos y materia orgánica en las aguas residuales⁽¹²⁾. La concentración de N y P en los órganos de las plantas regadas con ART no representan peligro para las mismas plantas, y como consecuencia tampoco para el humano o animal que lo consuma⁽¹²⁾. En Almería España, reutilizan las aguas residuales por su aporte moderado de sales y alto contenido de nutrimentos, especialmente de N, P y K, para las plantas⁽³⁷⁾. Estos resultados indican que las plantas al obtener mayor cantidad de N y P pudieron crecer con mayor facilidad. El mayor contenido de N y P en plantas de quinoa se encontró en las hojas, seguido del tallo y raíz respectivamente. En las plantas de maíz forrajero el contenido de P siguió el orden de la quinoa, y el contenido de N fue mayor en el tallo seguido de las hojas y raíz (Cuadro 7). Khaskhoussy *et al*⁽²²⁾, encontraron mayor contenido de N en maíz irrigado con ART: hojas 1.2 % y raíz 0.6 %, en comparación con el maíz irrigado con AD: hojas 1.0 % y raíz 0.45 %, Munir *et al*⁽³⁸⁾ demostraron que el contenido de N en plantas de maíz irrigadas con ART fue significativamente mayor: 1.08 %, en comparación a plantas irrigadas con AD: 0.66 %, similar tendencia se reflejó en el contenido de P en plantas irrigadas con ART: 0.19% e irrigadas con AD: 0.18 %. Por lo anterior se podría considerar el uso del agua residual tratada como una alternativa que ayudará a disminuir el uso de fertilizantes químicos en los cultivos forrajeros de la región y replicarlos en otros sitios.

Cuadro 7: Contenido de nitrógeno y fósforo en órganos de las plantas de quinoa y maíz forrajero cuando se regaron con agua dulce y agua residual tratada

Sitio - Tipo de agua	Quinoa			Maíz		
	Raíz	Hoja	Tallo	Raíz	Hoja	Tallo
Nitrógeno (%)						
I-AD	2.15 ^a	1.70 ^{ab}	4.07 ^b	0.67 ^c	1.64 ^c	0.76 ^a
I- ART	2.07 ^a	2.48 ^a	6.03 ^a	1.35 ^b	2.97 ^{ab}	3.32 ^a
C- AD	1.32 ^a	0.09 ^b	2.36 ^c	1.33 ^b	2.73 ^b	1.57 ^a
C-ART	1.91 ^a	1.95 ^{ab}	5.30 ^a	2.18 ^a	3.52 ^a	2.30 ^a
\bar{x} AD	1.73 ^a	3.21 ^b	1.33 ^b	1.00 ^b	1.16 ^b	2.18 ^a
\bar{x} ART	1.99 ^a	5.66 ^a	2.21 ^a	1.76 ^a	2.81 ^a	3.24 ^a
Fósforo (mg kg ⁻¹)						
I- AD	0.12 ^b	0.17 ^b	0.25 ^b	0.10 ^b	0.28 ^c	0.24 ^b
I- ART	0.22 ^a	0.20 ^a	0.34 ^a	0.16 ^a	0.45 ^a	0.43 ^a
C- AD	0.08 ^b	0.13 ^c	0.24 ^b	0.17 ^a	0.38 ^b	0.27 ^b
C-ART	0.10 ^b	0.11 ^c	0.39 ^a	0.08 ^b	0.30 ^c	0.10 ^c
\bar{x} AD	0.10 ^b	0.24 ^b	0.15 ^a	0.13 ^a	0.33 ^b	0.25 ^a
\bar{x} ART	0.16 ^a	0.37 ^a	0.16 ^a	0.14 ^a	0.38 ^a	0.27 ^a

I=Ixtlán, C=Capulálpam, AD= agua dulce, ART=agua residual tratada. \bar{x} = promedio.

^{acb} Valores con la misma letra dentro de cada columna, cultivo y elemento no son diferentes ($P \leq 0.05$).

Conclusiones e implicaciones

En el suelo el pH, la conductividad eléctrica y el contenido de materia orgánica no representaron algún riesgo cuando se aplica riego con agua residual tratada. La altura de la planta, el diámetro del tallo y el número de hojas en Quinoa fueron significativamente mayores cuando se aplicó riego con agua residual tratada, al igual que el cultivo de maíz excepto la variable número de hojas que no mostró significancia. La biomasa de ambos cultivos forrajeros fue significativamente mayor en las parcelas donde se aplicó el agua residual tratada en comparación al riego con agua dulce. El contenido de nitrógeno y fósforo fue significativamente mayor en las plantas que recibieron agua residual tratada tanto en quinoa como en maíz. El agua residual tratada al ser una fuente importante de nutrientes en los cultivos forrajeros representa una alternativa para disminuir significativamente el uso de fertilizantes químicos.

Literatura citada:

1. WWAP. Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos. Aguas residuales: El recurso desaprovechado. UNESCO. París. 2017.
2. CONAGUA. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del agua en México. MÉXICO, Gobierno de la República, SEMARNAT. www.gob.mx/conagua. México. 2017.
3. Gutiérrez-Guzmán UN, Ríos-Vega ME, Núñez-Hernández G, Esquivel-Romo A, Vázquez-Navarro JM, Anaya-Salgado A. Producción de maíz forrajero con dos sistemas de riego y tres niveles de la evaporación aplicada. *Rev Mex Cienc Agr* 2022; Pub. Esp. (28):263-273. doi: 10.29312/remexca.v13i28.3281.
4. Doreau M, Corson MS, Wiedemann SG. Water use by livestock: A global perspective for a regional issue?. *Animal Frontiers* 2012;02(02):9-16. doi:10.2527/af.2012-0036.
5. FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?, Informe 35 sobre temas hídricos, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma. 2013.
6. WHO. World Health Organization. Safe use of wastewater, excreta and greywater. Volumen I Policy and Regulatory Aspects. World Health Organization, France. 2006:
7. ONU. Organización de las Naciones Unidas. Las Aguas Residuales. El recurso desaprovechado. Informe Mundial sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). París, Francia. 2017.
8. Gómez PL, Aguilar CE. Guía de cultivo de la quinua. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima, Perú. 2016.
9. FIRA. Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. Panorama agroalimentario, maíz. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial, Gobierno de México. México. 2016.
10. OCDE-FAO. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos/ Food and Agriculture Organization of the United Nations. Perspectivas Agrícolas 2016-2025, Enfoque especial: África Subsahariana. París: 141. doi:http://dx.doi.org/10.1787/agr_outlook-2016-es. Paris. 2016. Consultada 8 Jun, 2022.

11. Mejía-Maravilla E, Siebe C, Paillés CA. Producción de aguas servidas, tratamiento y uso en México. (FAO, WHO, UNEP, UNU-INWEH, UNW-DPC, IWMI e ICID), Proyecto de Desarrollo de Capacidades para el Uso Seguro de Aguas Servidas en Agricultura. México. 2013: 13. https://www.ais.unwater.org/ais/pluginfile.php/378/mod_page/content/148/MEXICO. Consultado 22 Abr, 2023.
12. Cisneros-Estrada OX, Saucedo-Rojas H. Reúso de aguas residuales en la agricultura. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México. 2016. https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/reuso-aguas-residuales.pdf. Consultado 22 Abr, 2023.
13. García-Flores A. Uso de Aguas residuales para riego agrícola. Sexto Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas. 2021. <https://www.domosagua.com/blog/aguas-residuales-riego>. Consultado 23 Abr, 2023.
14. INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Anuario estadístico y geográfico de Oaxaca, México. México. 2016.
15. Diagnóstico y plan de desarrollo municipal de Ixtlán de Juárez. Consejo municipal de desarrollo rural sustentable, Ixtlán de Juárez, Oaxaca. México. 2009.
16. Plan de desarrollo municipal de Capulálpam de Méndez. Consejo municipal de desarrollo rural sustentable, Capulálpam de Méndez, Oaxaca. México. 2009.
17. Apaza V, Cáceres G, Estrada R, Pinedo R. Catálogo de variedades comerciales de quínoa en el Perú, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Representación de la FAO en el Perú. MINAGRI, INIA, AECID, FAO. Perú. 2013. <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/76>.
18. NOM-021-SEMARNAT-2000. Norma oficial mexicana, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación, 17 de octubre de 2000, México D.F. México. 2002.
19. Álvarez-Sánchez ME, Marín-Campos A. Manual de procedimientos analíticos de suelo y planta. Universidad Autónoma Chapingo. Laboratorio de Química, Departamento de Suelos. 2011.
20. Valero, D. ¿Cómo utilizar el agua residual de manera sostenible? Inspira Biotech. 2017: 17. <https://inspirabiotech.com/2018/04/09/como-reutilizar-el-agua-residual-de-manera-sostenible-la-biodepuracion-y-las-soluciones-basadas-en-la-naturaleza-son-claves-en-la-solucion/>. Consultado 29 Ene, 2021.

21. Abdel-Aziz R. Impact of treated wastewater irrigation on soil chemical properties and crop productivity. *Int J Water Resour Arid Environ* 2015;4(1):30-36.
22. Khaskhoussy K, Hachicha M, Kahlaoui B, Messoudi-Nefzi B. Effect of treated wastewater on soil and corn crop in the Tunisian area. *J Appl Sci Res* 2013;9 (1):132-140.
23. Méndez FMA, Ricardo CMP, Pérez PJ, Hernández CJ, Campos O. Uso de las aguas residuales para el riego de cultivos agrícolas en la agricultura urbana. *Rev Cienc Téc Agrop* 2006;15(3):17-21. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93215304>.
24. Zamora FR, Rodríguez-Guevara NC, Torres-Rodríguez DG, Yendis-Colina HJ. Uso de agua residual y contenido de materia orgánica y biomasa microbiana en suelos de la llanura de Coro, Venezuela. *Agric Téc Méx* 2009;35(2):211-218. <https://www.scielo.org.mx/pdf/agritm/v35n2/v35n2a8.pdf>.
25. Díaz-Cuenca E, Alavarado-Granados AR, Camacho-Calzada KE. El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera* 2012;14 (1):78-97.
26. Zamora F, Rodríguez N, Torres D, Yendis, H. Efecto del riego de aguas residuales sobre propiedades químicas de los suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro* 2008;20(3):193-199.
27. Hernández AE. Uso de aguas residuales en la agricultura. Estudio de caso; Distrito de riego 028, Tulancingo, Hidalgo, México. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Edo. de México. 2011.
28. IMTA-MMA y AB. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia. Guía técnica para el reúso de aguas residuales en la agricultura. Proyecto de Cooperación Triangular México Bolivia y Alemania. 2018.
29. FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Guía de cultivo de la quinoa. Segunda ed. Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima - Perú. 2016. <https://www.fao.org/3/i5374s/i5374s.pdf>.
30. Olague-Ramírez J, Montemayor-Trejo JA, Bravo-Sánchez SR, Fortis-Hernández M, Aldaco-Nuncio RA, Ruiz-Cerda E. Características agronómicas y calidad del maíz forrajero con riego sub-superficial. *Téc Pecu Méx* 2006;44(3):351-357. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61344305>.

31. González-Gonzales MI, Chiroles-Rubalcaba S. Uso seguro y riesgos microbiológicos del agua residual para la agricultura. *Rev Cubana Salud Pública* 2011;37(1):61-73. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcsp/v37n1/spu07111.pdf>.
32. Montero L, Cun R, Pérez J, Ricardo MP, Herrera J. Riego con aguas residuales en la producción sostenible de granos para alimento animal. *Rev Cienc Téc Agrop* 2012;21(2):48-52. <http://scielo.sld.cu/pdf/rcta/v20n4/rcta06411.pdf>.
33. Umaña-Gómez E. El reúso de aguas residuales para riego en un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) una alternativa ambiental y productiva. *La Calera* 2007;6:22-26.
34. Umaña-Gómez, E. Efectos en suelo y plantas debido al riego de un cultivo de maíz (*Zea mays* L.) con el efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Jinotepe. *Nexo* 2006;19:108-114.
35. Sánchez-Hernández MA, Hernández-Acosta E, Cristóbal-Acevedo D. Caracterización de suelos regados con aguas residuales para establecer un sistema agroforestal. *Rev Mex Cienc Agr* 2013;4(5):811-817.
36. Castro E, Mañas P, Sánchez JC, De las Heras J. Reutilización de aguas residuales depuradas procedentes de la E.D.A.R. de Albacete (S. E. España) en cultivos hortícolas. *Producción Protegida Vegetal* 2002;17(1):163-171. <http://www.ingenieroambiental.com/4014/hortícolas.pdf>.
37. Baeza-Cano R, Segura-Pérez ML, Contreras-Paris JI, Eymar-Alonso E, García-Delgado C, Moreno-Casco J, Suárez-Estrella F. Gestión sostenible de la reutilización de aguas residuales urbanas en los cultivos hortícolas. Almería: Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente. Almería. 2012. <https://docplayer.es/19760211-Gestion-sostenible-de-la-reutilizacion-de-aguas-residuales-urbanas-en-los-cultivos-hortícolas.html>.
38. Munir J, Mohammad R, Sami H, Laith R. Long term effect of wastewater irrigation of forage crops on soil and plant quality parameters. *El Sevier, Desalination* 2007;215:143–152.