



ORIGINAL

Caracterización espacial y estacional del agua de consumo proveniente de diversas fuentes en una localidad periurbana de Salta



María S. Rodríguez-Alvarez^{a,b,*}, Liliana B. Moraña^b, María M. Salusso^a y Lucas Seghezso^b

^a Laboratorio de Calidad de Agua, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina

^b INENCO-CONICET, Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina

Recibido el 9 de septiembre de 2016; aceptado el 19 de marzo de 2017

Disponible en Internet el 18 de agosto de 2017

PALABRAS CLAVE

Agua de consumo;
Análisis de
componentes
principales;
Argentina;
Salta;
Variables
bacteriológicas;
Variables
físicoquímicas

Resumen El control del agua de consumo es importante, ya sea que esta provenga de sistemas de potabilización o que carezca de tratamiento previo. El acceso creciente a agua potabilizada ha sido monitorizado a lo largo de los últimos años a fin de alcanzar los denominados «Objetivos de desarrollo del milenio», cuyo plazo se cumplió en 2015. De cara al futuro, los llamados «Objetivos de desarrollo sostenible», que se han propuesto para el año 2030, buscan garantizar el acceso a agua segura de toda la población mundial. En el marco de estas metas mundiales, es importante la monitorización de los sistemas locales. En este trabajo se estudió una población que cuenta con diferentes sistemas de provisión de agua de consumo, que incluyen o no el tratamiento de aquella. Se realizó la monitorización de todos los indicadores microbiológicos regidos por el Código Alimentario Argentino y de diversas variables físicoquímicas, a fin de diferenciar los sitios de muestreo de acuerdo con la influencia de la estacionalidad, el tipo de fuente de provisión de agua y la correlación entre las variables microbiológicas y las físicoquímicas. Se observó que el agua proveniente de fuentes con tratamiento presentó desviaciones en algunas de sus variables en época de lluvias, mientras que las fuentes sin tratamiento no cumplieron con los requerimientos bacteriológicos en forma permanente. Este estudio pone de manifiesto la importancia de reevaluar los sistemas de potabilización, que deberían garantizar su eficacia de manera constante, así como la inmediata necesidad de desarrollar nuevos sistemas de tratamiento para dar solución a la población que aún no cuenta con agua de consumo segura. © 2017 Asociación Argentina de Microbiología. Publicado por Elsevier España, S.L.U. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: solerod22@gmail.com (M.S. Rodríguez-Alvarez).

KEYWORDS

Drinking water;
Principal component
analysis;
Argentina;
Salta;
Bacteriological
variables;
Physicochemical
variables

Spatial and seasonal characterization of the drinking water from various sources in a peri-urban town of Salta

Abstract Drinking water monitoring plans are important to characterize both treated and untreated water used for drinking purposes. Access to drinking water increased in recent years as a response to the Millennium Development Goals set for 2015. The new Sustainable Development Goals aim to ensure universal access to safe drinking water by 2030. Within the framework of these global goals, it is crucial to monitor local drinking water systems. In this paper, treated and untreated water from different sources currently consumed in a specific town in Salta, northern Argentina, was thoroughly assessed. Monitoring extended along several seasons and included the physical, chemical and microbiological variables recommended by the Argentine Food Code. On the one hand, treated water mostly complies with these standards, with some non-compliances detected during the rainy season. Untreated water, on the other hand, never meets microbiological standards and is unfit for human consumption. Monitoring seems essential to detect anomalies and help guarantee a constant provision of safe drinking water. New treatment plants are urgently needed to expand the water grid to the entire population.

© 2017 Asociación Argentina de Microbiología. Published by Elsevier España, S.L.U. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

Contar con agua segura es esencial para la salud de los consumidores y constituye el objetivo primordial del tratamiento del agua y del control de calidad del agua de consumo, cuyas características finales dependerán de su origen (agua subterránea o superficial) y del tratamiento de potabilización al que sea sometida.

Para el control de la calidad del agua de consumo, muchos países adoptan reglamentaciones, basados, en su mayoría, en las guías para la calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud. Algunas reglamentaciones incluso recomiendan los procesos de potabilización adecuados. En el caso de Argentina, la reglamentación vigente es la estipulada por el Código Alimentario Argentino (CAA)¹⁰; esta indica los valores máximos permitidos (VMP) de los microorganismos indicadores (coliformes totales [CT], *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y bacterias mesófilas), como también de 31 parámetros fisicoquímicos y 28 sustancias orgánicas.

Es sabido que la calidad microbiológica del agua puede variar rápidamente y que la exposición simultánea de toda una población puede desencadenar brotes de enfermedades antes que la contaminación pueda ser detectada.

El control de los microorganismos indicados por el CAA tiene importancia primordial debido a su efecto inmediato en la salud de la población expuesta a una posible contaminación. Además, cada uno de ellos es indicador del funcionamiento del proceso de potabilización^{4,14,22}.

Por su parte, los indicadores fisicoquímicos brindan información sobre la calidad sanitaria, organoléptica y estética del agua. La mayoría de los contaminantes químicos causan efectos adversos para la salud luego de una exposición prolongada, es decir, durante años, a excepción de los nitratos, que pueden representar un peligro a corto plazo para los lactantes^{15,30} y pueden indicar contaminación por actividad agrícola, aguas residuales o de excretas

humanas y animales³⁰. Otro factor importante es el control de la potabilización durante épocas de lluvias en aquellos sitios en donde se producen escurrimientos que pueden alterar la calidad del agua. Esto obliga a tomar medidas de control en los procesos de coagulación-floculación, a fin de evitar modificaciones de los aspectos estéticos del agua, la formación de subproductos de la desinfección y, especialmente, el paso de patógenos hacia el sistema de distribución^{11,24}.

Nuestro país se encuentra entre los países que han alcanzado los denominados «Objetivos de desarrollo del milenio» respecto del agua³¹, es decir, que se ha logrado el objetivo de reducir a la mitad, desde 1990 hasta 2015, la proporción de las personas sin acceso sostenible al agua potable, y que un 91-100% de la población cuente con acceso a sistemas de agua mejorados (conexión domiciliar de agua corriente, grifo público, pozo perforado, pozo excavado protegido, manantial protegido, acopio de agua de lluvia). Sin embargo, el acceso a sistemas de agua mejorados no garantiza agua segura^{6,26,35}. Teniendo en cuenta este problema, se han propuesto «Objetivos de desarrollo sostenible», donde cada uno de los 17 objetivos que los conforman tienen metas específicas, que deben alcanzarse en los próximos 15 años (<http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>). En particular, la meta 6.1 (objetivo 6) es la siguiente: «Para el año 2030, lograr el acceso universal y equitativo al agua segura y al alcance de todos». Esto significa, entre otros aspectos, la consideración explícita de «agua segura», como aquella libre de agentes patógenos y de niveles elevados de productos químicos tóxicos^{32,33}. Estas nuevas metas ponen de manifiesto la necesidad de continuar avanzando en la implementación de sistemas de potabilización en lugares donde no existe tratamiento del agua de consumo, así como de reevaluar los sistemas de provisión de agua mejorados, a fin de determinar si cumplen con el requisito de provisión de agua segura.

El objetivo de este trabajo fue realizar la caracterización espacial y estacional en términos microbiológicos y fisicoquímicos del agua que consume la población de la localidad periurbana de Vaqueros, una zona especialmente interesante por presentar diferentes tipos de fuente para la provisión de agua de consumo: superficial, subterránea de pozos profundos y poco profundos, con tratamiento de potabilización o sin este.

Materiales y métodos

Zona de estudio y sitios de muestreo

La zona de estudio se limitó a la localidad de Vaqueros, una zona periurbana de Salta, de 4.575 habitantes¹⁷, ubicada en el noroeste argentino (24°41'17"S; 65°24'40"W; 1318 m.s.n.m.). El clima de esta localidad se define como subtropical serrano; es cálido, húmedo y con una estación seca⁷. Enero es el mes más cálido y julio el más frío, con temperaturas medias de 20,2°C y 8,7°C, respectivamente. Vaqueros presenta una época de lluvias bien definida entre los meses de diciembre y abril; enero es el mes con mayor registro pluvial (promedio de 258 mm en el período 2007-2011)¹⁸ y julio y agosto tienen registro nulo de lluvias.

La población de esta localidad está abastecida por diferentes fuentes de suministro de agua de acuerdo con su ubicación dentro de la localidad. La mayor parte de la población se abastece a través del agua provista por la empresa prestataria de servicios de agua local, que utiliza 2 plantas potabilizadoras y un pozo profundo para tal fin. El resto de la población utiliza acequias y pozos particulares.

Las muestras fueron tomadas del grifo de agua de red, y cuando esto no era posible, del agua usada por la familia para su consumo (del canal de irrigación superficial o de los pozos particulares [PP]). A los fines de este estudio, se dividió el muestreo en 5 grupos. El grupo 1 correspondió a las muestras de agua de red de las viviendas que reciben agua tratada por una planta de tratamiento construida en 1989, aquí identificada como planta nueva (PN). Esta planta provee agua potable a 982 hogares (el 67% de la población) y utiliza floculación, sedimentación, filtración rápida con arena y cloración. El grupo 2 se conformó por las muestras de agua de red de viviendas que reciben agua suministrada por una planta de tratamiento construida en 1972, en adelante llamada planta vieja (PV), que provee agua potable a 227 casas (15,5% de la población) y utiliza el mismo proceso de tratamiento que la PN. El grupo 3, al que llamaremos pozo de barrio (PB), correspondió a las muestras de agua corriente provenientes de un pozo de agua profundo (100 m), que abastece a 130 viviendas (8,9% de la población) y cuyo único tratamiento es la cloración. El grupo 4 estuvo constituido por muestras tomadas del agua superficial de la acequia y se identificará como Ac. En Vaqueros, 35 viviendas utilizan agua de acequia para consumo (2,4% de la población). El agua de acequia es también la fuente de provisión de ambas plantas potabilizadoras citadas anteriormente (PN y PV). El grupo 5, por último, correspondió a los PP construidos dentro del predio de la vivienda; son 93 viviendas las que tienen pozos que proveen agua para consumo (6,4% de la población). Estos pozos no sobrepasan los 20 m de

profundidad y explotan los niveles más superficiales de la freática libre.

De los sitios seleccionados se tomaron 96 muestras en total, en un período de 8 meses, 4 de época seca (agosto, septiembre, octubre y noviembre del 2010) y 4 de temporada de lluvias (enero, febrero, marzo y abril del 2011). Los grupos 1, 2 y 3 incluyeron 24 muestras cada uno; los grupos 4 y 5 incluyeron 16 y 8 muestras, respectivamente. En todos los casos, la mitad de las muestras se tomaron en la época de estiaje (época seca) y la otra mitad en la época de lluvias.

Análisis microbiológicos y fisicoquímicos

Las muestras de agua para los análisis fisicoquímicos y bacteriológicos se tomaron y conservaron siguiendo las recomendaciones estándares¹³.

Variables microbiológicas

Se determinó la densidad de CT, de coliformes fecales (CF) y de *E. coli*, empleando la técnica de fermentación en tubos múltiples, con caldo lauril triptosa con MUG (Fluorocult de Merck®, Cat. N.º 1.12588.0500), según el método 9221 F¹³. La confirmación de los CT se realizó con caldo verde brillante bilis (Merck®, Cat. N.º 1.05454.0500), según el método 9221 B¹³, mientras que los CF se confirmaron con caldo EC (Merck®, Cat. N.º 1.10765.0500), según el método 9221 E¹³. Se consideraron *E. coli* positivos los tubos con fluorescencia celeste a la luz ultravioleta luego de 24 h de incubación a 35 ± 0,5°C, y que luego de cubrir el medio con 5 mm de reactivo de Kovacs formaron un anillo rojo cereza. La técnica de fermentación de tubos múltiples para agua tratada se realizó utilizando una serie de 5 tubos con 10 ml de muestra y 10 ml de medio con doble concentración. Para agua no tratada, se utilizaron 3 series de 5 tubos cada una, con 10 ml de medio de doble concentración y 10 ml, 1 ml y 0,1 ml de muestra inoculadas, respectivamente, en cada serie. La densidad se expresa como número más probable en 100 ml (NMP/100 ml).

P. aeruginosa se determinó empleando la técnica de tubos múltiples, con caldo L-asparagina (Biopack, Argentina, código: 2000968500) y confirmación con caldo acetamida (Biopack, Argentina, código: 2000959900), según el método 9213 F¹³, expresando la densidad en NMP/100 ml.

El recuento heterotrófico en placa (RHP) se realizó en agar de recuento en placa (Britania, Argentina, código B0211205) mediante el método 9215 A¹³; el recuento se expresa en unidades formadoras de colonias por mililitro (UFC/ml).

Variables fisicoquímicas

Se determinaron las variables pH, conductividad, turbiedad, temperatura, oxígeno disuelto, color verdadero, concentración de nitratos, sólidos suspendidos, sólidos disueltos totales, alcalinidad y dureza siguiendo los métodos estandarizados para el análisis de agua^{13,16}, mientras que la determinación de cloro residual se realizó mediante el método colorimétrico de ortotolidina²⁵, solo en muestras de agua tratada.

Análisis estadístico

El análisis de los datos se llevó a cabo utilizando el programa INFOSAT versión 2011p bajo Windows. A fin de contrastar diferencias entre medias de 2 muestras independientes, tales como las comparaciones llevadas a cabo entre las épocas de estiaje vs. lluvias, se utilizó T-test (estadístico t de Student), luego de comprobar el cumplimiento de los supuestos de independencia, normalidad y homocedasticidad. En aquellos casos donde el conjunto de datos para analizar no cumplía con los supuestos para realizar la prueba paramétrica t de Student, se utilizó la prueba de Mann-Whitney (U), que es una de las pruebas (de contraste de dos muestras independientes) no paramétricas más poderosas, por lo que constituye la alternativa más útil en tales casos.

Cuando se realizaron comparaciones múltiples (tal es el caso de las comparaciones entre las distintas fuentes de procedencia de las muestras de aguas), se realizó ANOVA (análisis de varianza); previamente se testeó que los datos se distribuyeran normalmente (método gráfico de Q-Q-plot) y se realizó el test de Levene, a fin de comprobar la homogeneidad de las varianzas.

Para aquellos casos en que los datos no cumplieran con alguno de los supuestos que exige el análisis de la varianza convencional, se recurrió a la estadística no paramétrica a través del análisis de varianza de un factor de Kruskal-Wallis (H). El estadístico H de Kruskal-Wallis ordena por rangos los valores muestrales y «determina si la desigualdad entre las sumas de rangos es tan grande que probablemente no procedan de muestras tomadas de la misma población»²⁹.

Posteriormente al análisis de varianza, es necesario realizar comparaciones *post hoc* (o *a posteriori*), a fin de particularizar entre qué grupos hay diferencias, para lo cual se realizó la prueba de la diferencia honestamente significativa de Tukey, *honestly significant difference* (HSD). En aquellos casos en donde se utilizó estadística no paramétrica en las comparaciones múltiples (Kruskal-Wallis), se usó como prueba *a posteriori* el procedimiento descrito en Conover¹².

Para sintetizar la información aportada por los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos estudiados, se realizó un análisis de componentes principales (ACP), técnica de análisis multivariado cuyo objetivo es describir la variación de un conjunto de observaciones en términos de un conjunto de variables no correlacionadas, llamadas componentes, que son combinaciones lineales de las variables originales. Por lo tanto, es una técnica de reducción de la dimensionalidad estadística, ya que los componentes son combinaciones lineales ponderadas de las variables observadas.

Para analizar la correlación entre variables fisicoquímicas y microbiológicas se utilizó el análisis de correlación de Spearman.

Resultados

Resultados microbiológicos

En la [figura 1](#) se representan los valores obtenidos en gráficos de boxplot, diferenciando los resultados según la época del muestreo y la fuente de provisión del agua. También se indica el VMP por el CAA en líneas continuas. Debido a que el comportamiento de CF y de *E. coli* es similar, solo se presentan los gráficos para *E. coli*.

Las fuentes sin tratamiento presentaron valores que exceden los VMP en todas las variables bacteriológicas y en todas las épocas del año. Las muestras de agua con tratamiento de potabilización presentaron diferencias de acuerdo con la variable analizada y la época de muestreo. Todas estas fuentes presentaron CT en diferentes épocas del año y, a excepción de la PN (en la que nunca se detectó *E. coli*), también presentaron *P. aeruginosa* y/o *E. coli* en época de lluvia. La PV tuvo un máximo de *E. coli* > 16 NMP/100 ml y el PB de 9,2 NMP/100 ml, con valores de cloro de 0,90 mg/l y 0,60 mg/l, respectivamente. Asimismo, la PN presentó un registro máximo de > 16 NMP/100 ml para *P. aeruginosa*, con un tenor de cloro de 1,50 mg/l.

Con respecto al RHP, solo las muestras provenientes de plantas de tratamiento cumplieron con lo establecido por el CAA.

En la [tabla 1](#) puede observarse el contraste de a pares, donde las medias con una letra en común no son significativamente diferentes. De esta manera, mediante este tipo de análisis estadístico puede visualizarse fácilmente que las muestras de agua tratada (PV, PN, PB) presentaron diferencias significativas en los promedios de los recuentos con respecto a las muestras sin tratamiento alguno (PP, Ac). Las muestras provenientes de fuentes de agua no tratadas obtuvieron siempre los mayores registros de todas las variables microbiológicas estudiadas.

Al analizar si existían diferencias en la calidad microbiológica de las muestras de agua de red en función de la variación climática anual (época de lluvias vs. estiaje), se pudo constatar que siempre hubo un deterioro en la calidad microbiológica durante la estación de lluvias, con promedios estadísticamente superiores, a excepción de los CF, cuyos recuentos no mostraron variaciones de significación estadística. Al realizar el mismo análisis con las muestras de agua sin tratamiento, también se observó un deterioro en la calidad microbiológica durante la estación de lluvias, cuando se registraron los mayores valores promedio de estas variables, aunque no sucedió esto en el caso del RHP y de *E. coli*, que no registraron diferencias estadísticamente significativas.

El ACP realizado utilizando 5 variables microbiológicas (CT, CF, *E. coli*, *P. aeruginosa*, RHP) permitió reducir la información a 2 componentes que explicaron el 99% de la variación total de los datos. Estos resultados se observan en la [figura 2](#). El primer componente explicó prácticamente el 92% de la variación total; las variables que mayor información aportaron a este componente fueron RHP, CT y CF.

Hacia la región positiva de este componente se ubicaron las muestras correspondientes a las fuentes de agua que no reciben cloración; estas poseen los mayores registros de estas variables, tanto en el estiaje como en la época de crecidas. Hacia la región negativa de este componente se ubicaron los sitios restantes en ambos periodos hidrológicos, caracterizados por menores registros de las 3 variables antes mencionadas. El segundo componente explicó menos del 7% de la variación total registrada.

Resultados fisicoquímicos

En la [tabla 2](#) se muestran los registros de las variables fisicoquímicas analizadas según la época y la fuente de agua correspondiente. Se advierte que en las muestras de agua

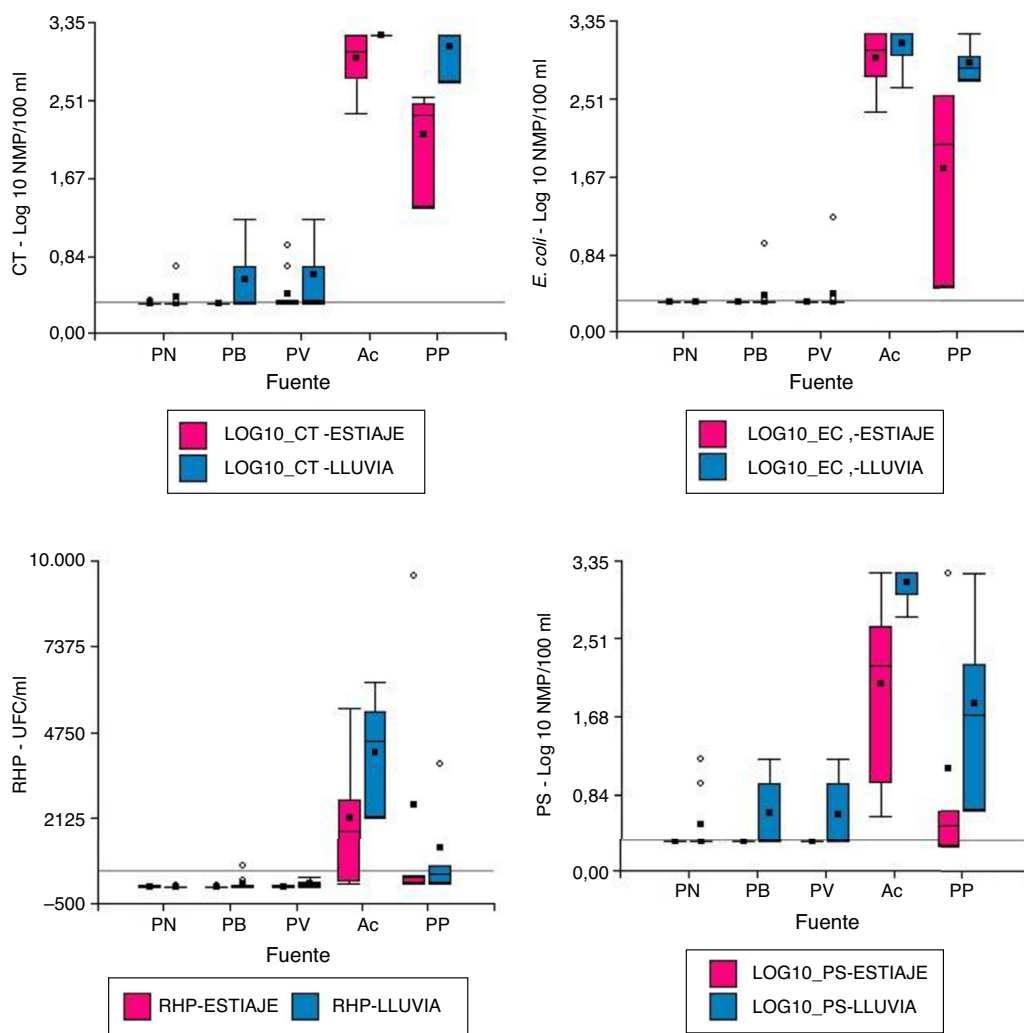


Figura 1 Gráficos de boxplot para las diferentes variables bacteriológicas de acuerdo a la fuente y la época. CT: coliformes totales; EC: *E. coli*; RHP: recuento heterotrófico en placa; PS: *P. aeruginosa*.

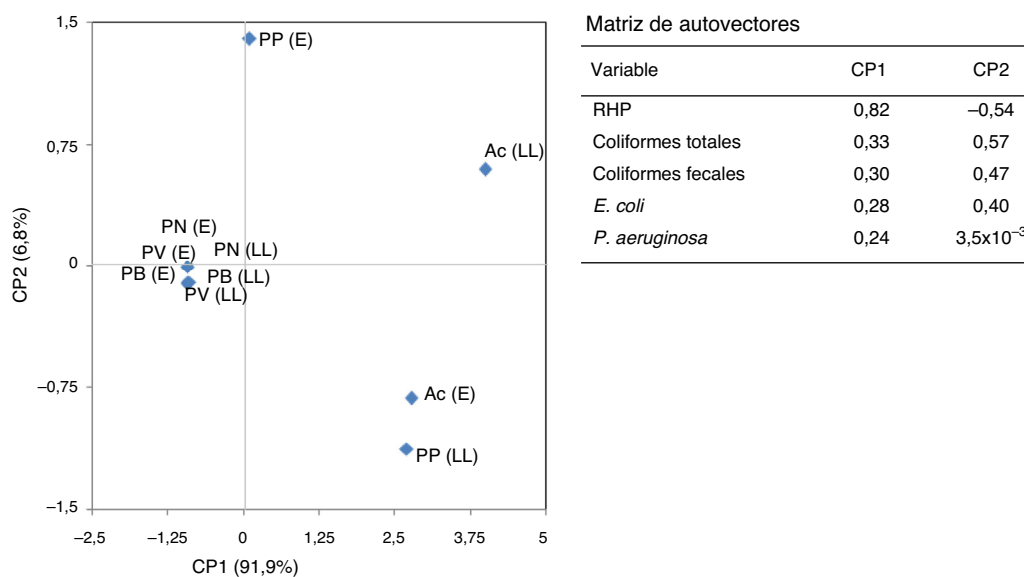


Figura 2 Análisis de componentes principales realizado utilizando las variables bacteriológicas de acuerdo a la fuente y la época.

Tabla 1 Registros de las variables bacteriológicas en función de la fuente de agua y contraste de a pares

Variable	Fuente	Media ^a	Desvío	Contrastes	Estadístico	Niv. prob.
RHP	PN	7,29	7,58	A	H = 53,77	< 0,0001
	PB	45,79	130,58	A B		
	PV	60,83	85,15	B		
	PP	1.861,88	3.340,47	C		
CT	Ac	3.147,69	2.144,28	C	H = 56,88	< 0,0001
	PN	2,36	0,84	A		
	PB	3,56	3,55	A		
	PV	4,66	5,05	A		
CF	PP	768,25	703,04	B	H = 53,82	< 0,0001
	Ac	1.344,44	438,98	B		
	PN	2,10	0,00	A		
	PV	2,73	3,04	A		
<i>E. coli</i>	PB	2,53	1,55	A	H = 53,79	< 0,0001
	PP	615,99	637,64	B		
	Ac	1.277,94	476,07	B		
	PN	2,10	0,00	A		
<i>P. aeruginosa</i>	PB	2,40	1,45	A	H = 38,68	< 0,0001
	PV	2,73	3,04	A		
	PP	537,11	519,53	B		
	Ac	1.204,75	511,76	B		
	PN	3,31	3,54	A		
	PV	4,26	5,13	A		
	PB	4,35	5,00	A B		
	PP	424,74	727,93	B		
	Ac	878,00	697,37	C		

Niv. prob.: nivel probabilidad.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

^a Unidades de la media: RHP: UFC/ml; CT: NMP/10 ml; CF: NMP/10 ml; *E. coli*: NMP/10 ml; *P. aeruginosa*: NMP/10 ml.

con tratamiento se obtuvieron valores de cloro residual, turbiedad y color verdadero que no cumplen con la normativa vigente establecida por el CAA. El 9,72% de las muestras presentaron valores de cloro residual inferiores a los recomendados. Solo la PN cumplió con la normativa. De la PV en época de lluvias y del PB durante el estiaje se obtuvieron muestras de agua no cloradas o levemente cloradas. El promedio de cloro libre registrado para las muestras provenientes de PB fue estadísticamente menor que el observado en las muestras que procedían del resto de las fuentes.

El 25% de las muestras de aguas con tratamiento de potabilización registraron valores de turbiedad mayores de 3 UNT, mientras que el 31,94% de aquellas excedió el valor de 5 UPt/Co de color verdadero. Con relación a esta última variable, el promedio durante la época de lluvias fue significativamente mayor que en el estiaje ($T = -2,68$; $p = 0,0109$).

Las variables fisicoquímicas en las muestras de PP presentaron diferencias significativas (a excepción de dureza y color) respecto de las demás muestras de agua analizadas. En particular, los valores de nitratos fueron muy superiores; estos excedieron el máximo permitido en los meses de octubre y noviembre (fig. 3), donde también se registraron los niveles de agua más bajos del PP (8,89 m) comparados con los meses anteriores (Ing. Emilce López, comunicación personal). Asimismo, las variables nitratos, pH, color verdadero y alcalinidad no presentaron diferencias significativas en las muestras de agua procedentes de acequia respecto de los promedios obtenidos en las originadas en la PN y la PV.

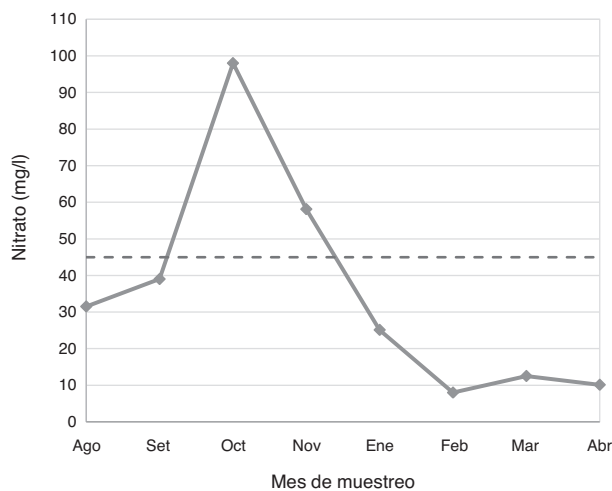


Figura 3 Valores de nitrato en muestras de pozo particular.

Por otro lado, las muestras de agua procedentes de fuentes subterráneas, es decir, PB y PP, presentaron un bajo contenido de oxígeno disuelto y menores valores de color, pH, turbiedad y sólidos suspendidos, diferenciándose significativamente de los registros de las aguas de origen superficial.

El ACP realizado, que utilizó 10 variables fisicoquímicas, permitió reducir la información a 2 componentes que explicaron el 67% de la variación total de los datos (fig. 4).

Tabla 2 Registros de las variables fisicoquímicas según época y fuente

Variables	Acequia		PB		PN		PP		PV	
	E	LL	E	LL	E	LL	E	LL	E	LL
<i>Cloro (mg/l)</i>										
Media	0	0	0,34	0,6	1,18	1,27	0	0	1,11	0,99
DE	0	0	0,31	0,29	0,59	0,43	0	0	0,46	0,82
Mín	0	0	0,05	0,30	0,20	0,20	0	0	0,60	0
Máx	0	0	0,90	0,90	2,00	1,50	0	0	2,00	2,00
<i>Oxígeno disuelto (mg/l)</i>										
Media	7,66	6,86	3,03	2,85	6,36	6,06	5,11	3,84	6,2	5,74
DE	0,85	0,39	0,72	0,38	0,37	0,56	0,58	0,96	0,55	0,56
Mín	6,78	6,4	2,11	2,18	5,74	4,96	4,32	2,86	5,58	4,87
Máx	9,06	7,45	4,84	3,31	6,81	6,96	5,7	4,9	7,23	6,85
<i>Temperatura (°C)</i>										
Media	18,13	20,03	21,35	21,66	18,82	20,81	20,38	20,03	19,55	20,08
DE	4,08	3,7	2,96	1,21	4,17	2,12	1,74	1,79	3,71	2,81
Mín	13,6	15,2	13,9	19,8	11,1	17,6	18,2	17,9	14,2	16,8
Máx	22,9	25,1	25,5	24,5	23,6	23,9	22,4	21,6	26,7	25,3
<i>pH</i>										
Media	7,7	7,25	7,29	6,9	7,73	7,19	6,36	6,49	7,68	7,15
DE	0,28	0,07	0,44	0,22	0,15	0,06	0,29	0,25	0,14	0,13
Mín	7,33	7,17	6,73	6,64	7,44	7,10	5,97	6,24	7,30	6,89
Máx	8,09	7,41	7,82	7,28	7,95	7,31	6,67	6,83	7,81	7,29
<i>Conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$)</i>										
Media	341,5	209,88	267,67	286,67	333	116,17	313,75	117,5	319,83	105,67
DE	17,79	74,51	18,34	17,59	25,4	26,96	42,46	13,48	34,5	14,51
Mín	312	130	231	243	305	90	274	104	267	84
Máx	357	302	294	305	376	170	358	136	361	134
<i>Turbiedad (UNT)</i>										
Media	10,84	32,26	1,82	1,03	5,13	4,25	1,64	2,42	1,11	3,72
DE	7,66	39,12	1,87	0,79	3,35	6,28	0,39	1,06	0,52	4,48
Mín	5,1	3,17	0,29	0,3	0,92	1,26	1,16	1,54	0,45	0,64
Máx	27,3	116	6,99	2,67	12	24	2,07	3,9	2,2	13,2
<i>Color (UPT/Co)</i>										
Media	7,38	18,75	2,33	0,42	4,42	11,08	3,25	5,5	3	14,25
DE	3,34	15,19	1,97	0,51	2,57	9,25	2,87	5,26	2,49	15,34
Mín	4	5	0	0	1	2	1	1	0	1
Máx	13	46	7	1	11	32	7	11	9	57
<i>Nitratos (mg/l)</i>										
Media	3,09	2,93	5,45	4,28	3,51	1,98	56,65	13,93	3,18	2,29
DE	0,72	0,85	1,57	1,39	0,68	0,94	29,75	7,67	0,7	1,35
Mín	1,9	1,8	2,9	2,1	2,5	0,4	31,5	8	1,9	0,4
Máx	3,6	4,2	8,8	5,4	4,8	3,2	98	25,1	4,2	5,4
<i>Alcalinidad (mg/l)</i>										
Media	106,75	85,88	98,92	98,17	112,17	58,42	63,25	48	105,08	56,58
DE	4,71	7,66	16,64	1,34	11,13	15,78	13,28	3,83	11,11	11,78
Mín	96	75	62	96	101	41	55	45	83	38
Máx	110	94	137	102	135	83	83	53	119	75
<i>Dureza total (mg/l)</i>										
Media	132,25	87,75	105	98,42	130	54,25	103,75	50	125,67	49,5
DE	3,65	18,96	4,43	1,38	7,31	18,34	10,56	3,83	6,67	9,89
Mín	128	64	98	96	109	39	93	45	113	34
Máx	139	111	111	101	137	86	117	53	131	64

Tabla 2 (continuación)

Variables	Acequia		PB		PN		PP		PV	
	E	LL	E	LL	E	LL	E	LL	E	LL
Sólidos suspendidos (mg/l)										
Media	20,13	71	1,58	1,33	9,75	6,58	2,25	10,25	1,67	5,25
DE	7,64	73,98	1,44	0,98	5,59	10,89	0,96	15,35	1,3	6,11
Mín	9	14	0	0	2	2	1	1	0	1
Máx	31	202	5	3	20	41	3	33	4	22
Sólidos disueltos totales (mg/l)										
Media	191,75	120,88	154,17	166,17	168,67	86,93	196	102	169,58	80,5
DE	29,71	49,62	23,6	9,9	27,65	22,07	31,14	12,78	13,41	16,53
Mín	159	14	98	147	113	61	163	89	156	56
Máx	236	173	185	177	205	126	234	118	195	105

En negritas se indican los valores que no cumplen con lo establecido por el CAA.
E: época de estiaje; LL: época de lluvias.

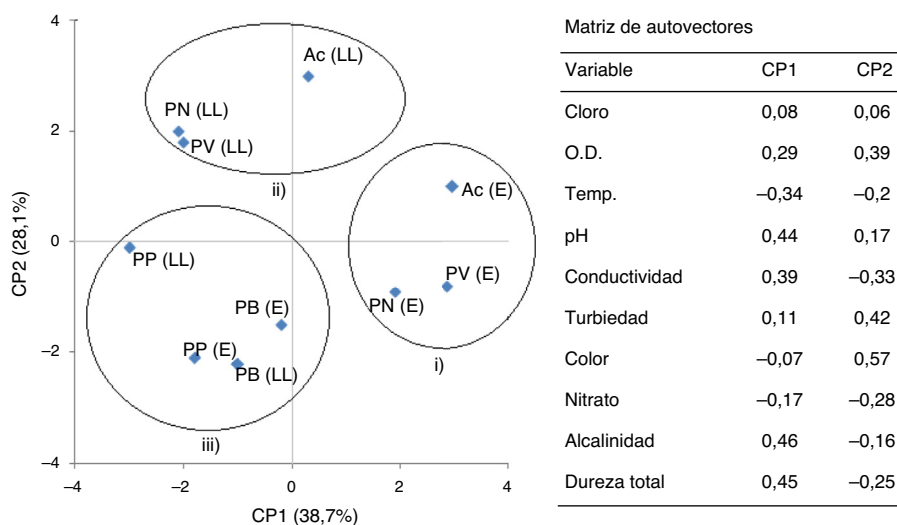


Figura 4 Análisis de componentes principales utilizando variables fisicoquímicas.

El primer componente explicó un 38,7% de la variación total; las variables que más contribuyeron a esta variabilidad fueron dureza total, alcalinidad, pH y conductividad. Este componente explicó mayormente las diferencias en la calidad de aguas debido a la estacionalidad, ya que en la zona de estudio hay una marcada diferencia en el ciclo hidrológico entre la época de estiaje y la de lluvias. Hacia la región positiva se ubicaron los muestreos realizados durante el estiaje, caracterizados por poseer mayores registros de estas variables que las obtenidas en la época de lluvia (fig. 4, sector i).

El segundo componente explicó el 28,1% de la variación total; las variables que mayor información aportaron a aquel fueron color, turbiedad y oxígeno disuelto. Hacia la región positiva de este componente se ubicaron los sitios de aguas superficiales (plantas de tratamientos y acequias). El agua de acequia (Ac) suministra el agua que ingresa a ambas plantas potabilizadoras (PN y PV). Estas muestras se caracterizaron por tener los mayores registros de color, turbiedad y oxígeno disuelto (fig. 4, sector ii). Hacia la región negativa de ambos componentes se ubicaron las

muestras correspondientes a pozos de aguas subterráneas (PB y PP) obtenidas tanto en estiaje como en época de crecidas; estas se caracterizaron por los menores registros de color, turbiedad y oxígeno disuelto (fig. 4, sector iii).

Variables microbiológicas frente a variables fisicoquímicas

Se observó que la correlación entre las variables bacteriológicas y el cloro residual fue negativa en todos los casos (coeficientes entre -0,56 y -0,69) y altamente significativa ($p < 0,001$), lo que indica la importante dependencia de la multiplicación bacteriana en relación con el tenor de cloro presente.

Las variables fisicoquímicas oxígeno disuelto, turbiedad y sólidos suspendidos también presentaron correlación positiva y altamente significativa con las distintas variables bacteriológicas ($p < 0,001$).

Discusión

El análisis de los resultados presentados demuestra que la calidad del agua de consumo depende de diferentes factores, todos ellos de igual importancia. Entre estos factores cabe mencionar la estacionalidad, el origen del agua (superficial o subterránea) y el tipo de tratamiento recibido.

Tal como lo indica el ACP realizado, la estacionalidad se vincula con modificaciones en las propiedades fisicoquímicas del agua. El aumento en los registros de turbiedad, color y contenido de sólidos suspendidos del agua de acequia en época de lluvias responde al lavado de los suelos, que arrastra sedimentos y contaminantes producto de la actividad de la zona rural (animales de granja, caballos, ganado bovino, agricultura) hacia las acequias.

Por otro lado, los valores de conductividad, dureza total, sólidos disueltos y alcalinidad total son mayores en el estiaje debido a un proceso de concentración de caudal durante esta época. Este tipo de comportamiento también se ha registrado en estudios realizados en otras aguas superficiales^{3,5,19,23}, aunque en otros casos la variación estacional es inversa a la encontrada en este trabajo²⁷.

Estos cambios en las características fisicoquímicas obligan a realizar reajustes en los procedimientos de potabilización del agua, como la filtración y la cloración. Si estos procesos no se realizan correctamente, la presencia de bacterias en el agua es inminente, tal como lo indican los coeficientes de correlación encontrados entre el tenor de cloro y la turbiedad con la presencia de bacterias en el agua. Evidentemente, en las plantas nueva y vieja han existido fallas en el sistema de tratamiento en época de lluvias, lo que ha provocado bajos niveles de cloro, altas turbiedades y la presencia de microorganismos como *E. coli* o *P. aeruginosa*. La presencia de bacterias debido a los bajos niveles de cloro y los elevados índices de turbiedad son datos coincidentes con lo que informan estudios realizados sobre otras fuentes de agua^{8,21}.

Los valores de bacterias elevados (CT, *E. coli*, *P. aeruginosa* y RHP) en todos los sistemas de agua tratada (tanto superficial como subterránea), que presentaron valores de cloro residual dentro de lo establecido por el CAA, ameritan un análisis especial. Estos casos podrían estar asociados a la presencia de biofilms —tal como ha sido reportado en estudios previos^{20,34}—, por lo cual sería importante poner énfasis en el buen mantenimiento del sistema de distribución de agua.

La correlación negativa entre la cloración y el contenido de bacterias y la correlación positiva entre el contenido de bacterias y las variables oxígeno disuelto, turbiedad y sólidos indican que el agua subterránea, al tener menor contenido de oxígeno disuelto y menores registros en los valores de turbiedad y sólidos suspendidos, propenden a una mejor calidad bacteriológica del agua, aunque no garantiza la ausencia de biofilms. Por otro lado, en el caso de aguas superficiales, el tratamiento de potabilización debe considerar la cloración y la turbiedad como un punto crítico de control, ya que turbiedades altas conducen a una desinfección más ineficaz y, consecuentemente, a una alta carga bacteriana. Por lo tanto, valores altos de turbiedad y de sólidos suspendidos, y bajos tenores de cloro residual, pueden ser indicio de la presencia de bacterias indicadoras en el suministro de agua de consumo.

Las muestras de PP presentaron elevados valores de bacterias y de nitratos. Teniendo en cuenta los valores bacteriológicos obtenidos en este sitio y de acuerdo con estudios previos, se puede inferir que el pozo se encuentra expuesto a la contaminación fecal, producto de la gran cantidad de cámaras sépticas y pozos ciegos presentes en la zona^{1,30}, lo cual da lugar a elevados valores de nitratos^{2,9}. La época seca provoca, además, la concentración de nitratos.

En resumen, los hallazgos reportados indican fallas en el sistema de potabilización del agua que consumen los habitantes de la localidad de Vaqueros (provincia de Salta), tanto en el de la ON como en el de la PV. Dichas fallas dan lugar a la presencia de bacterias que representan un peligro para la salud. Asimismo, existe la posibilidad de que se formen biofilms, que dan origen a la mala calidad bacteriológica esporádica, aun cuando la turbiedad y la cloración se encuentren controladas. Este fenómeno de biofilms también explicaría los desvíos bacteriológicos en las muestras de PB (agua subterránea de pozo profundo). Respecto de las muestras de PP (agua subterránea de pozo poco profundo), la presencia de valores elevados de nitratos y de bacterias de origen fecal evidencian una contaminación debido a la falta de sistemas cloacales en la zona o al inadecuado tratamiento de las cámaras sépticas. Asimismo, el consumo de agua proveniente de acequia pone en peligro permanente la salud de las personas.

Los resultados publicados en Rodríguez-Alvarez et al.²⁸ demuestran, mediante una evaluación cuantitativa de riesgo microbiológico, que existe un riesgo al cual se exponen las personas de la localidad de Vaqueros de acuerdo con las desviaciones en los parámetros microbiológicos. Estos autores encontraron que las muestras de agua de consumo de esta localidad alcanzan los valores aceptables de riesgo respecto de *E. coli*, pero no se logra esto en relación con *P. aeruginosa* en algunos casos; la situación es menos aceptable para el caso de las personas expuestas a muestras sin tratamiento. Esos hallazgos, junto a los que aporta el presente estudio, ponen de manifiesto la necesidad de reevaluar los sistemas mejorados de agua potable, como también el caso de quienes aún no cuentan con agua potable, en pos de lograr de manera exitosa los objetivos de desarrollo sostenible citados en la sección Introducción. Asimismo, es necesario recalcar la necesidad de desarrollar regulaciones que contemplen un adecuado tratamiento de potabilización y la infraestructura necesaria para evitar desviaciones en los parámetros de control fisicoquímicos y microbiológicos del agua de consumo.

Responsabilidades éticas

Protección de personas y animales. Los autores declaran que para esta investigación no se han realizado experimentos en seres humanos ni en animales.

Confidencialidad de los datos. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Derecho a la privacidad y consentimiento informado. Los autores declaran que en este artículo no aparecen datos de pacientes.

Financiamiento

Los autores desean agradecer a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) y al Consejo de Investigación de la UNSa (CIUNSa) por el apoyo financiero a través de una beca doctoral PRH y el Proyecto N.º 1854, respectivamente.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

- Adetunji VO, Odetokun IA. Groundwater contamination in Agbowo community, Ibadan Nigeria: Impact of septic tanks distances to wells. *Malays J Microbiol.* 2011;7:159–66.
- Akaahan TJ, Oluma HOA, Sha'Ato R. Physico-chemical and bacteriological quality of water from shallow wells in two rural communities in Benue State, Nigeria. *Pak J Anal Environ Chem.* 2010;11:73–8.
- Akindele EO, Adeniyi IF, Indabawa II. Spatio-temporal assessment and water quality characteristics of Lake Tiga, Kano, Nigeria. *Res J Environ Earth Sci.* 2013;5:67–77.
- Allen MJ, Edberg SC, Reasoner DJ. Heterotrophic plate count bacteria —what is their significance in drinking water. *Int J Food Microbiol.* 2004;92:265–74.
- Awoyemi OM, Achudume AC, Okoya AA. The physicochemical quality of groundwater in relation to surface water pollution in Majidun Area of Ikorodu, Lagos State, Nigeria. *Am J Water Res.* 2014;2:126–33.
- Bain R, Cronk R, Wright J, Yang H, Slaymaker T, Bartram J. Fecal contamination of drinking-water in low- and middle-income countries: A systematic review and meta-analysis. *PLoS Med.* 2014;11 [consultado 3 Ago 2015]. Disponible en: <http://journals.plos.org/plosmedicine/article/asset?id=10.1371%2Fjournal.pmed.1001644.PDF>
- Bianchi AR, Yáñez CE. Las precipitaciones en el noreste argentino. 2.ª ed. Salta: Ediciones INTA, EEA; 1992.
- Bishankha S, Bhatta DR, Joshi TP. Assessment of microbial quality of chlorinated drinking tap water and susceptibility of gram negative bacterial isolates towards chlorine. *J Sci Eng Technol.* 2013;9:222–9.
- Bourne AC. Assessing the contamination risk of private well water supplies in Virginia. Tesis de Master of Science in Biological Systems Engineering 2001. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA 2001. [consultado 27 Jun 2016]. Disponible en: <http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07302001-174954/unrestricted/Thesis.pdf>
- CAA, Código Alimentario Argentino. Bebidas hídricas, agua y agua gasificada; 2012. Capítulo XII [consultado 2 Jun 2014]. Disponible en: http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp
- Cohn PD, Cox M, Berger PS. Health and Aesthetic Aspects of Water Quality. En: Letteman R, editor. *Water quality and treatment: A handbook of community water supplies.* 5th ed. New York: McGraw Hill; 1999, 2. 1-2.86.
- Conover W. *Practical nonparametric statistics.* 3rd ed. New York: John Wiley; 1999.
- Eaton AD, Clesceri LS, Rice EW, Greenberg AE. *Standard methods for the examination of water and wastewater.* 21st ed. Washington DC: APHA; 2005.
- EPA, Environmental Protection Agency. Distribution System Indicators of Drinking Water Quality. Office of Water (4601 M). Office of Ground Water and Drinking Water. Total Coliform Rule Issue Paper. Standards and Risk Management Division, 1200 Pennsylvania Ave., NW Washington DC 20004; 2006.
- EPA, Environmental Protection Agency. National primary drinking water regulations. EPA 816-F-09-004; 2009 [consultado 2 Abr 2014]. Disponible en: <http://water.epa.gov/drink/contaminants/>
- HACH Company. DR 5000 Spectrophotometer, Working procedures, 1st ed. Germany: Hach Company; 2005. [Manual de análisis de agua, segunda edición en español].
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC). Base de Datos REDATAM; 2010 [consultado 12 Sept 2014]. Disponible en: <http://200.51.91.245/argbin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPV2010B&MAIN=WebServerMain.inl>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Base de información de estaciones meteorológicas. Periodo de registro 2007-2011; 2014 [consultado 2 Mayo 2014]. Disponible en: <http://anterior.inta.gov.ar/prorenea/info/resultados/meteorologia/base.asp>
- Khound NJ, Phukonb P, Bhattacharyya KG. Physico-chemical studies on surface water quality in the Jia-Bharali River Basin, North Brahmaputra Plain, India. *Arch Appl Sci Res.* 2012;4:1169–74.
- Kilb B, Lange B, Schaule G, Flemming HC, Wingender J. Contamination of drinking water by coliforms from biofilms grown on rubber-coated valves. *Int J Hyg Environ Health.* 2003;206:563–73.
- LeChevallier MW, Evans TM, Seidler RJ. Effect of turbidity on chlorination efficiency and bacterial persistence in drinking water. *Appl Environ Microbiol.* 1981;42:159–67.
- Mena KD, Gerba CP. Risk Assessment of *Pseudomonas aeruginosa* in water. *Rev Environ Contam Toxicol.* 2009;201:71–115.
- Mustapha A, Aris AZ, Ramli MF, Juahir H. Temporal aspects of surface water quality variation using robust statistical tools. *The Scientific World Journal.* 2012;294540 [consultado 2 Jun 2014]. Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3415074/>
- NHMRC/NRMMC, National Health and Medical Research Council, National Resource Management Ministerial Council. Australian drinking water guidelines, Paper 6, Updated December 2014. Commonwealth of Australia, Canberra [consultado 13 Ene 2015]. Disponible en: https://www.nhmrc.gov.au/_files_nhmrc/publications/attachments/eh52_australian_drinking_water_guidelines_150108.pdf
- OPS, Organización Panamericana de Salud. Manual para análisis básicos de calidad del agua de bebida. OPS/CEPIS/PUB/02.93; 2004 [consultado 6 Mar 2015]. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/CD-GDWQ/Biblioteca/Manuales.Guias.Libros/DW/manual%20analisis%20basicos%20CA.pdf>
- Prüss-Ustün A, Bartram J, Clasen T, Colford JM Jr, Cumming O, Curtis V, Bonjour S, Dangour AD, De France J, Fewtrell L, Freeman MC, Gordon B, Hunter PR, Johnston RB, Mathers C, Mäusezahl D, Medlicott K, Neira M, Stocks M, Wolf J, Cairncross S. Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene in low- and middle-income settings: A retrospective analysis of data from 145 countries. *Trop Med Int Health.* 2014;19:894–905.
- Raji MIO, Ibrahim YKE, Tytler BA, Ehinmidu JO. Physico-chemical characteristics of water samples collected from river Sokoto, Northwestern Nigeria. *Atmos Clim Sci.* 2015;5:194–9.
- Rodriguez-Alvarez MS, Weir MH, Pope JM, Seghezze L, Rajal VB, Salusso MM, Moraña LB. Development of a relative risk model for drinking water regulation and design recommendations for peri urban region of Argentina. *Int J Hyg Environ Health.* 2015;218:627–38.
- Siegel S. *Estadística no paramétrica.* México: Editorial Trilla; 1972.

30. WHO, World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. 2011 [consultado 14 Jun 2014]. Disponible en: http://whqlibdoc.who.int/publications/2011/9789241548151_eng.pdf
31. WHO/UNICEF. Joint Monitoring Programme (JMP) for water supply and sanitation, progress in drinking water and sanitation; 2014 [consultado 15 Jun 2014]. Disponible en: <http://www.wssinfo.org/documents/>
32. WHO/UNICEF. Joint monitoring programme (JMP) for water supply and sanitation. WASH POST-2015: proposed targets and indicators for drinking-water, sanitation and hygiene; 2014 [consultado 15 Jun 2014]. Disponible en: <http://www.wssinfo.org/fileadmin/user.upload/resources/post-2015-WASH-targets-factsheet-12pp.pdf>
33. WHO/UNICEF. Joint monitoring programme (JMP) for water supply and sanitation. WASH Post-2015. Proposed indicators for drinking water, sanitation and hygiene; 2015 [consultado 18 Ago 2016]. Disponible en: <http://www.wssinfo.org/fileadmin/user.upload/resources/JMP-WASH-Post-2015-Brochure.pdf>
34. Wingender J, Flemming HC. Contamination potential of drinking water distribution network biofilms. *Water Sci Technol.* 2004;49:277–86.
35. Wolf J, Prüss-Ustün A, Cumming O, Bartram J, Bonjour S, Cairncross S, Clasen T, Colford JM Jr, Curtis V, De France J, Fewtrell L, Freeman MC, Gordon B, Hunter PR, Jeandron A, Johnston RB, Mäusezahl D, Mathers C, Neira M, Higgins JP. Assessing the impact of drinking water and sanitation on diarrhoeal disease in low- and middle-income settings: Systematic review and meta-regression. *Trop Med Int Health.* 2014;19:928–42.