

Evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico por consumo de agua en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México

• Ane Galdos-Balzategui* •
Fundación Cántaro Azul, A.C.

*Autor para correspondencia

• Jesús Carmona de la Torre • Héctor Javier Sánchez-Pérez •
• Juan Jesús Morales-López • Arturo Torres-Dosal • Sergio Gómez-Urbina •
El Colegio de la Frontera Sur, México

Resumen

Galdos-Balzategui, A., Carmona de la Torre, J., Sánchez-Pérez, H. J., Morales-López, J. J., Torres Dosal, A., & Gómez-Urbina, S. (enero-febrero, 2017). Evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico por consumo de agua en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 133-153.

La ciudad de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México, carece de información sobre la calidad microbiológica del agua del sistema municipal de distribución de agua potable. Se desconocen, por tanto, los riesgos derivados de su ingesta y el impacto que supone para la salud pública. El presente estudio evaluó el riesgo por contaminación microbiana de las fuentes de agua del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Municipal (SAPAM) mediante la aplicación de una Evaluación Cuantitativa del Riesgo Microbiológico (ECRM). Se analizó la contaminación por *Escherichia coli* en muestras de agua de todas las fuentes. Para calcular la ECRM y la carga de enfermedad, se estimó la concentración de cuatro patógenos de referencia (*E. coli* O157:H7, *Campylobacter*, rotavirus y *Cryptosporidium*) utilizando datos publicados de la razón de éstos con *E. coli*. Todas las fuentes presentaron contaminación fecal. La probabilidad de infección anual fue mayor que el nivel de seguridad establecido por la EPA en todos los patógenos. La suma de la carga de enfermedad fue de 2.40×10^3 años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) por persona/año, mucho más elevada que el nivel de referencia de la OMS. El riesgo no fue homogéneo para toda la población, se encontraron diferencias en la exposición y riesgo, según fuente de abastecimiento. Este estudio demuestra la necesidad de implementar mejoras en el sistema de distribución de agua potable que reduzcan el riesgo para la salud de la población.

Palabras clave: evaluación del riesgo, ECRM, AVAD, sistema de distribución de agua potable, desigualdad del riesgo, México.

Abstract

Galdos-Balzategui, A., Carmona de la Torre, J., Sánchez-Pérez, H. J., Morales-López, J. J., Torres Dosal, A., & Gómez-Urbina, S. (January-February, 2017). Quantitative microbial risk assessment of drinking water in San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 8(1), 133-153.

The city of San Cristobal de Las Casas, Chiapas, Mexico lacks information on the microbiological quality of the municipal drinking water distribution system. Therefore, the risks associated with its intake and the impact it has on public health is unknown. This study assessed the risk of microbial contamination from the Potable Water and Sewerage Municipal (SAPAM) water sources, by conducting a Quantitative Microbiological Risk Assessment (QMRA). Samples from each source were analyzed for *Escherichia coli*. The QMRA and disease burden were calculated using estimates of the concentrations of four reference pathogens (*E. coli* O157:H7, *Campylobacter*, rotavirus and *Cryptosporidium*) based on published ratios between *E. coli* and the indicated pathogens. All sources showed fecal contamination. The annual probability of infection was higher than the safety threshold set by the EPA on all previously indicated pathogens. The sum of the disease burden was 2.40×10^3 DALYs per person per year, much higher than WHO reference level. The risk was not uniform for the entire population, inequalities in the exposure and the risk were found according to the source of supply. This study demonstrates the need to implement improvements in drinking water distribution system to reduce the public health risk.

Keywords: Risk assessment, QMRA, DALY, drinking water distribution system, risk inequality, Mexico.

Recibido: 30/08/2014
Aceptado: 23/08/2016

Introducción

Los peligros microbianos derivados del consumo de agua tratada de manera no eficiente por parte de los sistemas municipales se encuentra ampliamente documentada (OMS, 2008). Los riesgos para la salud relacionados con el agua de consumo más comunes y extendidos son las enfermedades infecciosas ocasionadas por agentes patógenos como bacterias, virus y parásitos (como protozoos y helmintos). Las asociadas con su ingesta son de tipo gastrointestinal, como las diarreas, algunas de las cuales son incluso mortales (Westrell, 2004).

Las enfermedades gastrointestinales son uno de los principales problemas de salud en México (Hernández-Cortez, Aguilera-Arreola, & Castro-Escarpili, 2011). Si bien el país está experimentando una transición epidemiológica en algunas de sus entidades, la región sureste, donde se ubica el estado de Chiapas, mantiene tasas elevadas de morbilidad y mortalidad infantil causadas por enfermedades infecciosas, muchas de ellas de origen gastrointestinal. La mala calidad del agua se identifica como uno de los principales factores de riesgo de mortalidad infantil por enfermedades infecciosas, junto con la desnutrición (Stevens *et al.*, 2008). Según datos del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica (Sinave, 2012), Chiapas presenta las tasas más altas de mortalidad infantil del país por enfermedad diarreica aguda (EDA) de 10.76/1 000 nacidos vivos, cifra tres veces más elevada que la media nacional de 2.9/1 000 nacidos vivos.

México continúa enfrentando en la actualidad diversos y severos problemas de abastecimiento de agua, como escasez y contaminación (Sánchez-Pérez, Vargas-Morales, & Mendez-Sánchez, 2000; Haro, Nubes, & Calderón, 2012). La protección y vigilancia de los riesgos para la salud derivados del consumo de agua entubada, competencia de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris), en la mayoría de casos se reduce a la cloración de manera intermitente y al monitoreo de los niveles de cloro residual (Cofepris, 2008). No

obstante, el país carece de información confiable, producida de manera periódica, sobre la calidad del agua para consumo humano.

El estado de Chiapas se conforma administrativamente por 122 municipios y cuenta con 37 plantas (31 de tratamiento de aguas residuales y seis potabilizadoras) en operación, lo cual denota una gran falta en infraestructura para el manejo de las aguas residuales y para abastecer de servicios de agua potable a la población (Conagua, 2011). Además, una gran parte de las plantas registran numerosos problemas de funcionamiento. Según datos de 2011 de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2011), de las 37 plantas en el estado, al menos 12 funcionan de manera deficiente por azolvamiento o por necesidad de reparación (en otras 19 de ellas no se especifica su estado).

San Cristóbal de Las Casas es una de las principales ciudades chiapanecas, pero carece, al igual que muchas localidades, tanto de planta de tratamiento de aguas residuales, como de planta de potabilización (INIFAP, 2012). El único tratamiento que recibe el agua entubada es desinfección con cloro en los sistemas de bombeo y conducción de los manantiales, específicamente en los tanques elevados de almacenamiento temporal que bombean el agua y en los cárcamos de bombeo. Esta práctica se lleva a cabo de manera irregular por falta de cloro; no se tratan todas las fuentes a diario y se estima que la cantidad de cloro es insuficiente en muchos casos (SAPAM, 2011). La calidad del agua potable de la ciudad se ve amenazada por falta de tratamiento, y por la contaminación en la red de distribución, debido a que opera a baja presión. Dado que el suministro de agua a través de la red es intermitente, todas las viviendas cuentan con uno o varios tanques de almacenamiento. La desconfianza de la calidad del agua de la llave por parte de la población ha provocado un cambio en el hábito hacia el consumo de agua envasada, de la cual hay también evidencias sobre mala calidad en buena parte de las marcas comerciales (Haro *et al.*, 2012).

Como puede observarse, el estado actual del sistema de agua entubada supone una potencial

amenaza para la salud de la población, en especial para los grupos más vulnerables (adultos mayores, embarazadas, y niños y niñas) (Westrell, 2004). Según fuentes oficiales (Haro *et al.*, 2012), está ampliamente aceptado que los problemas de mala calidad de agua son severos y aun así se desconoce la magnitud del riesgo que esto implica para la salud de la población.

La evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico (ECRM) proporciona una herramienta para estimar la carga de enfermedad de microorganismos patógenos presentes en sistemas de agua potable. Mediante la ECRM es posible caracterizar el riesgo no sólo de los individuos sino de las comunidades y poblaciones para poder tomar decisiones sobre el manejo adecuado del sistema de abastecimiento del agua (Hass, Rose, & Gerba, 1999). La gran mayoría de las ECRM ha sido utilizada sólo en países desarrollados. Recientemente se han llevado a cabo estudios que han demostrado que la ECRM se puede emplear en países con escasez de datos, y que el resultado puede proporcionar información valiosa para la gestión del suministro de agua (Howard, Pedley y Tibatemwa, 2006; Mara, Sleight, Blumenthall, & Carr, 2007; Hunter, Zmirou-Navier, & Hartemann, 2009; Labite *et al.*, 2010). El presente estudio se llevó a cabo con el objetivo de cuantificar el riesgo para la salud pública generado por el Sistema de Agua y Alcantarillado Municipal (SAPAM) de San Cristóbal de Las Casas mediante una evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico.

Material y métodos

Área de estudio

San Cristóbal de Las Casas, cabecera municipal y de la región de los Altos, es la tercera ciudad más grande del estado de Chiapas. Su población es de 158 027 habitantes, según el último Censo de Población y Vivienda del INEGI de 2010 y se considera como de media marginación socioeconómica (INEGI, 2010). Su clima es característico de los bosques de lluvia subtropicales, con una temperatura máxima anual promedio de 23 °C

(Bencala *et al.*, 2006) y una precipitación media anual de 1 100 mm (INIFAP, 2012).

La ECRM se realizó para el agua suministrada por el Sistema de Agua y Alcantarillado Municipal (SAPAM), el cual cuenta con 11 fuentes de abastecimiento de agua (diez manantiales y un pozo profundo), pero para efectos operativos trabaja con ocho fuentes, pues tres de los manantiales (Real del Monte, Campanario y Pedregal) se consideran como una sola fuente, al igual que otros dos (Navajuelos y María Auxiliadora) también son considerados como tal. Cada fuente tiene su propio sistema de bombeo, conducción, tanques de almacenamiento y redes de distribución; es decir, el sistema municipal es un conjunto de sistemas individuales con producción y cobertura variable que abastecen a diferentes sectores de la ciudad. De acuerdo con la evidencia empírica, el SAPAM cubre alrededor de 94% de los habitantes de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas. La población restante cubre sus necesidades a través de sistemas independientes de agua, los cuales provienen de la misma cuenca, por lo que se prevé que los resultados obtenidos en este estudio en dicha fracción poblacional sean similares.

Evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico (ECRM)

La evaluación del riesgo asociado con la ingesta de agua distribuida por el SAPAM se investigó a través de una ECRM. Los cuatro pasos para implementarla fueron identificación del peligro, evaluación de la exposición, análisis de la dosis-respuesta y caracterización del riesgo (Hass *et al.*, 1999).

1. Identificación del peligro

Se emplearon cuatro patógenos de referencia (OMS, 2008) para representar bacterias (*Escherichia coli* 0157:H7, *Campylobacter*), virus (rotavirus) y protozoos (*Cryptosporidium*). Estos patógenos fueron escogidos por encontrarse bien caracterizados en la literatura y por su importancia para la salud pública.

2. Evaluación de la exposición

Recolección y análisis de las muestras de agua

Los datos necesarios para evaluar la exposición microbiológica se obtuvieron del monitoreo de la calidad del agua de consumo humano realizado por los Laboratorios Institucionales (LI's) de la Unidad San Cristóbal de Las Casas, de El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), los cuales cuentan con la acreditación de la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), representante a nivel internacional para la ISO/IEC-17025:2005.

La calidad bacteriológica del agua (CBA) se analizó según las ocho fuentes operativas, a partir de las muestras tomadas en los últimos puntos (tanques elevados y cárcamos de bombeo) que distribuyen el agua a las viviendas. Se analizaron los datos de 10 tanques de almacenamiento y tres cárcamos de bombeo, obteniendo de esta manera resultados de la CBA al cual se expone aproximadamente el 94% de las personas usuarias del SAPAM. Asimismo, se calculó la concentración media de coliformes totales y fecales de cada fuente para poder estimar la exposición de todas las personas usuarias del agua municipal.

Se recolectaron 206 muestras de agua. La recogida y análisis de éstas se hizo mediante monitoreo comunitario, según regula la Global Water Watch (GWW, 2010), técnica aprobada por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América (US EPA).

La toma de muestras de agua fue mensualmente entre junio de 2012 y mayo de 2013. Para la recolección se usaron pipetas estériles. Se colectaron dos repeticiones de un volumen de 5 ml para cada una de las muestras, las cuales se transportaron en frascos plásticos con medio de cultivo Coliscan EasyGel. Para su conservación se utilizaron hieleras de unicel (poliestireno expandido) con gel congelante a una temperatura inferior a los 10 °C. El tiempo desde la colecta hasta la preparación de las placas de Petri fue inferior a dos horas. Se emplearon dos indicadores para determinar la CBA: coliformes totales y coliformes fecales (*Escherichia coli*), cuya

identificación se llevó a cabo mediante cultivo en medio Coliscan EasyGel. La temperatura de incubación empleada fue de 37 °C de 24 a 48 horas. Para la lectura de resultados, las colonias con coloración rosa o rojo oscuro se consideraron bacterias coliformes, y las colonias con coloración azul o violeta, *E. coli* (GWW, 2010).

La *E. coli* enterohemorrágica (EHEC) es uno de los cinco grupos de *E. coli* patógenos para el ser humano (Hernández-Cortez et al., 2011; Hass et al., 1999), siendo *E. coli* O157:H7 la cepa más importante para la salud pública, por sus graves repercusiones para la salud (Westrell, 2004). Debido a que aproximadamente 8% del total de *E. coli* es patógeno (Haas et al., 1999), los resultados del monitoreo se multiplicaron por 0.08 y la evaluación del riesgo de todos los *E. coli* patógenos se calculó con base en el impacto esperado por *E. coli* O157:H7. Asimismo, para estimar la concentración del resto de organismos se recurrió a los datos publicados en la literatura sobre la razón *E. coli*: patógenos. Se asumió una razón de 1:0.52 (Smeets, 2008), 1:10⁻⁵ (Howard et al., 2007; Gortáres-Moroyoqui et al., 2011) y 1:10⁻⁶ (Howard et al., 2007) para *Campylobacter*, rotavirus y *Cryptosporidium*, respectivamente. Se emplearon relaciones de agua cruda (sin tratamiento) para el *Campylobacter* y de aguas residuales para el resto de microorganismos, según la disponibilidad de los datos en la literatura consultada.

Se calculó la media de concentración para cada patógeno y fuente (Benke & Hamilton, 2007). Para estimar el límite superior (percentil 95) se hicieron simulaciones Monte Carlo, un enfoque utilizado para evaluar la incertidumbre asociada con las estimaciones llevadas a cabo con pequeñas bases de datos microbiológicos (Teunis, Medema, Kruidenier, & Havelaar, 1998).

Consumo de agua

En las Guías para la Calidad de Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2008) se asume que el volumen de agua ingerida sin hervir por persona corresponde a un litro

diario. Si bien es una cifra que sobrestima la ingesta en países desarrollados, puede subestimarla en países en vías de desarrollo. Varias ECRM realizadas en este tipo de países asumen una ingesta de 2.9 litros diarios por persona (Machdar, Van der Steen, Raschid-Sally, & Lens, 2013; Labite *et al.*, 2010), sugerido en las Guías de la OMS en relación con la necesidad de hidratación (OMS, 2003). En México, en un estudio epidemiológico de tres comunidades de Tlaxcala (Navarro, Maya, & Lucario, 2007), el volumen medio de ingesta diaria se determinó en 1.8 litros, con un rango de 0.4 a 3.4 l/día. En otra investigación en el estado de Sonora (Grijalva-Haro, Barba-Leyva, & Laborín-Alvarez, 2001) se encontraron cifras parecidas: una media de ingesta diaria de 1.9 l y un rango de 1 a 3 l/día. En el presente estudio se analizó el consumo de agua, asumiendo que la ingesta de la población se ajusta a una distribución triangular, con una media de 1.8 l/día y un rango de 1-2.9 l/día. La dosis de exposición para cada patógeno se calculó a partir del producto de la concentración de organismos en cada una de las fuentes analizadas y el volumen de agua ingerida.

La frecuencia de exposición corresponde al número de días al año que se consume el agua. En el presente estudio se calculó como el producto del porcentaje de muestras positivas a *E. coli* y los 365 días del año. Se asumió que las personas sólo estaban expuestas los meses para los cuales se encontró contaminación fecal. Se optó por esta aproximación, a fin de evitar que las muestras negativas para *E. coli* desviaran los resultados, subestimando el riesgo.

Población susceptible

La población susceptible se calculó a partir de una encuesta realizada por Carmona *et al.*, en el año 2013 (Ecosur, 2013), en la que se encuestaron 502 personas de 17 colonias de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas: se recogió información sobre hábitos relacionados con agua doméstica. El 53.4% reportó consumir agua de llave, aunque cabe resaltar que la diferencia entre algunos barrios en dicho consumo fue hasta de

60 puntos porcentuales (30 y 90%). Este hecho implica una notable desigualdad entre barrios en cuanto a la exposición. Entre las personas que reportaron consumir agua de llave, 10.4% no la hierve. En el presente estudio, con base en dichos hallazgos, se calculó el riesgo para cada una de las fuentes en dos escenarios: para 5.6%, correspondiente al porcentaje de población que consume agua de llave sin hervir (riesgo más “realista”), y para el total de la población de San Cristóbal de Las Casas usuaria del servicio del SAPAM (potencial riesgo).

El número de habitantes expuestos a cada fuente se estimó a partir de los usuarios beneficiarios de los servicios del SAPAM de 2011. La población resultante es superior al último censo de población y vivienda del INEGI de 2010. No obstante, se decidió utilizar la cifra del SAPAM debido a que se consideró una cifra más aproximada a la realidad, pues existe una gran cantidad de población no registrada por el INEGI (2010).

En cuanto a la susceptibilidad a los microorganismos, se asumió que toda la población era susceptible a la infección por *E. coli* O157:H7, *Campylobacter* y *Cryptosporidium*. Aunque es posible adquirir cierta inmunidad a estos patógenos, se asumió que ésta sería de corta duración (Howard *et al.*, 2006). Por otra parte, la fracción de población susceptible al rotavirus se ve influenciada por la inmunidad desarrollada. Se ha documentado que en los países en vías de desarrollo, los niños y niñas mayores de cinco años son inmunes al rotavirus, debido a una repetida exposición en los primeros años de vida (OMS, 2008). En San Cristóbal de Las Casas, los niños y niñas menores de cinco años, de acuerdo con la única fuente de información disponible (INEGI, 2010), representan alrededor de 10.4% de total de la población. Según cifras oficiales, la cobertura de vacunación de rotavirus en niños y niñas de uno y dos años en Chiapas para el año 2012 fue del 58.1% (SSA, 2012). La vacuna tiene una eficacia de 74% (Staat *et al.*, 2011); por lo tanto, la estimación final de población susceptible para el rotavirus utilizada fue la siguiente:

$$10.4\% \times 5.6\% \times (1 - (58.1\% \times 74\%)) = 0.33\%$$

de población susceptible.

3. Análisis dosis-respuesta

El riesgo se estimó utilizando funciones dosis-respuesta publicadas y recomendadas para cada patógeno (Hass, Rose, Weir, Gurian, & Mitchell, 2014). Se empleó un modelo exponencial para el *Cryptosporidium* (Messner, Chappell, & Okhuysen, 2001) y β -Poisson para el resto de organismos (Black, Levine, Clements, Hughes, & Blaser, 1998; DuPont et al., 1975; Ward et al., 1986), tal y como se muestra en el cuadro 1.

4. Caracterización del riesgo

La caracterización del riesgo se determinó utilizando tres indicadores de salud: probabilidad de infección anual, número de casos de gastroenteritis y años de vida ajustados por discapacidad (AVAD).

El riesgo de infección se calculó por medio de simulaciones Monte Carlo parciales, utilizando las estimaciones puntuales de mejor ajuste de infectividad (α , β) (cuadro 1), distribuciones log-normal para las concentraciones de patógenos y distribuciones triangulares para el volumen de ingesta diario. Se empleó el programa *Crystal Ball v.11.1.2.3.000*, aplicando 10 000 iteraciones. El riesgo de infección se expresó con el valor medio y el límite superior, percentil 50 y 95, respectivamente (Hunter et al., 2011).

Cálculo de la carga de enfermedad

La carga de enfermedad, expresada en años de vida ajustados por discapacidad (AVAD) se calculó siguiendo el método descrito en las Guías para la Calidad del Agua Potable de la OMS (OMS, 2008). Los AVAD constituyen un indicador que incluye los años de vida perdidos (AVP) por muerte prematura, y los años perdidos por enfermedad o discapacidad (APD). Para la estimación de los AVP se utilizó el promedio de esperanza de vida al nacer (EV) en Chiapas, que es de 72.3 años (INEGI, 2013). Con el fin de mantener una comparación consistente a través de los cuatro patógenos estudiados, la carga de enfermedad para cada uno se refirió únicamente a la asociada con enfermedades diarreicas y la muerte (Howard et al., 2006). Los datos sobre la duración, gravedad y probabilidad de presentar dichos efectos en la salud para cada patógeno se extrajeron de la literatura, tal como se especifica en el cuadro 2.

Con base en las estimaciones de Havelaar y Melse (2003), 47% de los casos de diarrea por infección de *E. coli* O157:H7 presenta sangre en las heces. Se ha estimado que la letalidad en países en vías de desarrollo es de 0.7% del total de casos (Howard et al., 2006). Para estimar el número de AVP por gastroenteritis se utilizó la distribución por edad de todas las muertes por gastroenteritis en Chiapas entre 1998 y 2012 (INEGI, 2012), obteniéndose una media de AVP por caso de 51.2 años. Este dato se empleó en

Cuadro 1. Funciones dosis-respuesta utilizadas en la evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico (ECRM) del estudio.

Patógeno	Modelo	Parámetros	Fuente
<i>Escherichia coli</i> O157:H7 ^a	β -Poisson	$\alpha = 0.265$	DuPont et al. (1975)
		$\beta = 116.755$	
<i>Campylobacter</i>	β -Poisson	$\alpha = 0.144$	Black et al. (1998)
		$\beta = 7.285$	
rotavirus	β -Poisson	$\alpha = 0.253$	Ward et al. (1986)
		$\beta = 0.426$	
<i>Cryptosporidium</i>	Exponencial	$r = 0.0572$	Messner et al. (2001)

^a Se emplearon los parámetros del modelo dosis-respuesta de *Shigella*.

Cuadro 2. Cálculo de la carga de enfermedad por patógeno.

Efecto en la salud	Gravedad ^a	Duración ^b		Carga de enfermedad (AVAD) por caso ^c	Probabilidad del efecto ^d	AVAD por efecto en la salud ^e
		Días	Años			
<i>E. coli</i> O157:H7						
Diarrea acuosa	0.067	3.4	0.009	0.0006	53%	3.31 x 10 ⁻⁴
Diarrea con sangre	0.39	5.6	0.015	0.0060	47%	2.81 x 10 ⁻³
Muerte por diarrea	1		51	51	0.70%	3.58 x 10 ⁻¹
Total						3.62 x 10 ⁻¹
<i>Campylobacter</i>						
Gastroenteritis	0.067	5.1	0.014	0.0009	94%	8.82 x 10 ⁻⁴
Gastroenteritis severa	0.39	8.4	0.023	0.0090	6%	5.38 x 10 ⁻⁴
Muerte por gastroenteritis	1		51	51	0.10%	5.12 x 10 ⁻²
Total						5.26 x 10 ⁻²
Rotavirus						
Diarrea leve	0.1	7	0.02	0.0019	85.60%	1.64 x 10 ⁻³
Diarrea severa	0.23	7	0.02	0.0044	14.40%	6.35 x 10 ⁻⁴
Muerte por diarrea	1		71	71	0.60%	4.28 x 10 ⁻¹
Total						4.30 x 10 ⁻¹
<i>Cryptosporidium</i>						
Diarrea acuosa	0.067	7.2	0.02	0.0013	100%	1.32 x 10 ⁻³
Muerte	1		39	39	0.024%	9.45 x 10 ⁻³
Total						1.08 x 10 ⁻²

^a La gravedad y duración se extrajeron de Havelaar & Melse (2003).

^b Para calcular los años de vida perdidos por muerte (AVP), en el caso de *E. coli* O157:H7 y *Campylobacter*, se utilizó la distribución por edad de todas las muertes por gastroenteritis en Chiapas entre 1998 y 2012; para rotavirus se empleó la esperanza de vida al nacer de Chiapas- muerte con un año de edad (72 - 1 = 71 años); para *Cryptosporidium* se calculó en el grupo de personas con VIH/SIDA.

^c AVAD (años de vida ajustados por discapacidad) = gravedad x duración (años).

^d Fuente: Havelaar & Melse (2003) y Haas et al. (1999). La letalidad del *Cryptosporidium* se basó en 10% de la prevalencia de personas que viven con VIH/SIDA en México.

^e Carga de enfermedad por caso multiplicado por la probabilidad de cada efecto de salud.

el cálculo de la carga de mortalidad tanto de *E. coli* O157:H7 como de *Campylobacter*.

En el caso del *Campylobacter*, la carga de enfermedad se calculó para la gastroenteritis, estimando que 6% de los casos desarrolla diarrea grave, que necesitará de consulta médica. La tasa de letalidad utilizada para este patógeno fue de 0.1% (Havelaar & Melse, 2003).

Entre los daños a la salud que ocasiona la infección por rotavirus se encuentra la diarrea leve, diarrea grave y muerte. Se estima que 85.6% de los casos es de diarrea leve; 14.4%, diarrea grave, y letalidad de 0.60% (Havelaar & Melse, 2003; Howard et al., 2006). La gastroenteritis por rotavirus lo suficientemente grave como para

requerir hospitalización e incluso ocasionar la muerte se produce con mayor frecuencia en niños y niñas menores de dos años. Por esta razón, el cálculo de la carga de mortalidad se basó en la media de un año de edad (Havelaar & Melse, 2003).

Para el caso de la infección por *Cryptosporidium*, se tomó la diarrea acuosa como su principal efecto para la salud, con una duración media de 7.2 días (Havelaar & Melse, 2003). La muerte ocurre mayoritariamente en individuos inmunodeprimidos, como es el caso de las personas con VIH/SIDA (OMS, 2008), por lo que se utilizó este grupo para calcular la carga de mortalidad (Labite et al., 2010; Machdar et al.,

2013; Howard *et al.*, 2006). La prevalencia estimada de VIH/SIDA en México, según el Centro Nacional para la Prevención y Control del VIH/SIDA (CENSIDA, 2013) es de 0.24%. Dadas las dificultades y ausencia de información para estimar la tasa de letalidad por *Cryptosporidiosis* dentro de este grupo, se utilizó una estimación de dicha tasa de 10% dentro de la población con VIH/SIDA (Havelaar & Melse, 2003) (equivalente a 0.024% del total de la población). Los AVP para este grupo se estimaron a partir de la distribución por edad de la prevalencia de VIH/SIDA (CENSIDA, 2013), la cual se encontró dividida en 15 grupos etarios. La edad media de muerte para cada grupo se calculó bajo la asunción de que las personas con VIH/SIDA mueren 1.5 años después de haber contraído la infección por *Cryptosporidium* (Labite *et al.*, 2010; Machdar *et al.*, 2013). Con base en dichas consideraciones, la estimación de los AVP a causa del *Cryptosporidium* fue de 39.37 años.

Validación

Los resultados se validaron con datos epidemiológicos de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas. Se obtuvo el número de casos de enfermedades diarreicas agudas (EDA) atendidos por la Secretaría de Salud (SSA), el Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE) y el Instituto Mexicano de Seguridad Social (IMSS)-Oportunidades en 2013, y se comparó con los cálculos obtenidos en la ECRM.

Resultados

Calidad microbiológica del agua

En el cuadro 3 se presentan los resultados del monitoreo sobre CBA del SAPAM realizado entre junio de 2012 y mayo de 2013. Los datos confirman la irregularidad en el proceso de

Cuadro 3. Calidad bacteriológica del agua del Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Municipal (SAPAM), según fuente (manantial). San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México, año 2012-2013.

Fuente de abastecimiento	Número de muestras	Coliformes totales (UFC/100ml)				<i>Escherichia coli</i> (UFC/100ml)			
		Positivos (%)	Media ^a	Máx. ^b	Desviación estándar	Positivos (%)	Media	Máx.	Desviación estándar
Kisst	38	63	743.33	2 396.43	3 692.98	53	87.86	222.67	75.83
La Almolonga	28	54	163.33	483.68	212.07	32	78	246.08	103.29
La Hormiga	22	64	1 731.43	4778.4	1 630.03	23	423.33	1 278.87	523.12
Peje de Oro	15	80	407.14	1 402.44	653.31	53	272.5	869.35	391.98
Navajuelos y María Auxiliadora	47	47	462.14	1 486.98	614.69	15	275	752.31	262.48
Pozo Sta. María	22	55	112.86	309.85	110.25	9	50 ^c	-	-
San Juan de Los Lagos	17	94	1 671.11	5 650.62	2 427.51	53	76	194.62	63.32
Real del Monte, Pedregal y Campanario ^d	17	35	595	1 848.09	705.41	29	140	408.15	157.96
Global ^e	206	59	893.15	3 271.95	1 759.06	32	167.45	521.24	201.22

^a La media y la máx. se calcularon de las muestras positivas para cada indicador.

^b Representa el mayor valor esperado de la variabilidad de la concentración, el percentil 95.

^c El resultado fue positivo en una muestra en 5 ml y, por lo tanto, la concentración estimada es conservadora.

^d Los resultados del Campanario se emplearon también para Real del Monte y el Pedregal.

^e La concentración media de todas las fuentes tanto de coliformes totales como de *E. coli*.

desinfección, pues todas las fuentes presentaron contaminación fecal por lo menos en alguna de las muestras de agua. De las 206 muestras recolectadas, 59 y 32% resultaron positivas para coliformes totales y *E. coli*, respectivamente. La concentración media en las muestras analizadas fue de 893.15 UFC/100 ml coliformes totales y 167.45 UFC/100 ml *E. coli*, superando de forma considerable los niveles marcados por la Normativa Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 que señala como límite permisible para agua de buena calidad desde el punto de vista bacteriológico la ausencia tanto de coliformes totales como de coliformes fecales (es decir, 0 UFC/ml).

Los manantiales La Kisst, Peje de Oro y San Juan de Los Lagos, que atienden alrededor de 31, 16 y 1% de la población, respectivamente, fueron las fuentes con mayor porcentaje de

muestras con contaminación fecal: 53%. Se encontraron concentraciones diferentes de contaminación según fuente de abasto. Los datos revelan que el manantial de La Hormiga (el cual suministra agua a la periferia de la ciudad, aproximadamente 16% de la población) es la fuente con mayor concentración bacteriana (con una media de 1731.43 UFC/100 ml coliformes totales y 423.33 UFC/100 ml de *E. coli*). Por otra parte, la concentración de cada uno de los patógenos analizados, estimada a partir de la razón *E. coli*: patógenos, se muestra en el cuadro 4.

Evaluación del riesgo

Se estima que alrededor de 196 687 personas que viven en San Cristóbal de Las Casas (un 94% de su población) reciben agua del SAPAM. Los manantiales La Kisst y La Almolonga son las

Cuadro 4. Estimación de la población expuesta y días de exposición según fuente, y concentración media de los patógenos de referencia empleados en la evaluación cuantitativa del riesgo microbiológico (ECRM). San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México, año 2012-2013.

Fuente	Población expuesta (%) ^a	Días al año de exposición ^b	Concentración ^c							
			<i>Escherichia coli</i> O157:H7 (UFC/100 ml)		<i>Campylobacter</i> (UFC/100 ml)		Rotavirus (UFP/100 ml)		<i>Cryptosporidium</i> (oocistos/100 ml)	
			μ^d	δ^e	μ	δ	μ	δ	μ	δ
Kisst	60 015 (31%)	192	7.03	5.82	45.69	38.65	8.79×10^{-4}	7.55×10^{-4}	8.79×10^{-5}	7.62×10^{-5}
La Almolonga	42 947 (22%)	117	6.24	7.57	40.56	52.10	7.80×10^{-4}	1.05×10^{-3}	7.80×10^{-5}	9.55×10^{-5}
La Hormiga	32 220 (16%)	83	33.87	39.85	220.13	294.73	4.23×10^{-3}	5.18×10^{-3}	4.23×10^{-4}	5.62×10^{-4}
Peje de Oro	31 325 (16%)	195	21.80	28.41	141.70	193.93	2.73×10^{-3}	3.35×10^{-3}	2.73×10^{-4}	4.03×10^{-4}
Navajuelos y María Auxiliadora	18 755 (10%)	54	22.03	20.50	143.00	131.23	2.75×10^{-3}	2.66×10^{-3}	2.75×10^{-4}	2.55×10^{-4}
Pozo Sta. María	6 600 (3%)	33	4.00	-	26.00	-	5.00×10^{-4}	-	5.00×10^{-5}	-
San Juan de Los Lagos	2 775 (1%)	193	6.08	5.16	39.52	32.13	7.60×10^{-4}	6.03×10^{-4}	7.60×10^{-5}	6.35×10^{-5}
Real del Monte, Pedregal y Campanario	2 050 (1%)	107	11.20	12.46	72.80	85.77	1.40×10^{-3}	1.54×10^{-3}	1.40×10^{-4}	1.51×10^{-4}
Global ^f	196 687(100%)	115	12.39	16.96	80.53	108.95	1.55×10^{-3}	2.03×10^{-3}	1.55×10^{-4}	2.11×10^{-4}

^a Estimada a partir del número de usuarios del servicio de agua entubada del SAPAM. Según datos del SAPAM de 2011. No corresponde con la población susceptible al rotavirus, la cual se estimó mediante aproximaciones al número de niños y niñas menores de cinco años no vacunados (OMS, 2008).

^b Días al año de exposición = porcentaje de muestras positivas para *E. coli* x 365 días.

^c Basada en la razón *E. coli*: patógeno.

^d Media.

^e Desviación estándar.

^f La concentración media de todas las fuentes para cada patógeno.

fuentes más importantes, ya que entre ambas abastecen a más de la mitad de la población de San Cristóbal de Las Casas (31 y 22%, respectivamente) que dispone de servicio de agua entubada (cuadro 4).

Para el global de San Cristóbal de Las Casas se estimó que la frecuencia de exposición fue de 115 días al año. No obstante, dependiendo de la fuente de abastecimiento, los días de exposición variaron considerablemente, desde 33 días en el pozo profundo Santa María, hasta 195 en el manantial Peje de Oro, el cual abastece de agua a 16% de la población.

El cuadro 5 muestra la probabilidad de infección anual calculada a partir de los modelos de la ECRM (cuadro 1). Las bacterias fueron los patógenos para los cuales se estimó una mayor probabilidad de infección: *Campylobacter* (1.00), *E. coli* O157:H7 (2.98×10^{-1}). Para rotavirus y *Cryptosporidium* fue, respectivamente, 1.12×10^{-2} y 1.09×10^{-4} . Dichos resultados revelan que el riesgo de infección estimado es mayor que el nivel de seguridad establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) de 10^{-4} (CAMRA, 2013), para todos los patógenos y fuentes, excepto para *Cryptosporidium*

en el pozo profundo Santa María. En el caso de las bacterias, la probabilidad de infección anual varió como máximo en un orden de magnitud entre las fuentes analizadas, en tanto que el rotavirus y *Cryptosporidium* presentaron una variabilidad mayor.

El número de casos anuales de gastroenteritis se calculó a partir de la multiplicación del porcentaje de población expuesta a cada fuente y el riesgo de efecto en la salud anual (el cual, a su vez, es un producto entre la probabilidad de infección anual y la probabilidad de enfermar, habiéndose producido la infección). Entre 5.6% de población que consume agua de llave sin hervir se estimó un total de 4 345 (5 528, límite superior) casos anuales de gastroenteritis por *E. coli* O157:H7, *Campylobacter*, rotavirus y *Cryptosporidium*. El *Campylobacter* sería el responsable de 70% de los casos, y según fuente de abastecimiento, el manantial La Kisst sería la fuente responsable del mayor número de casos (1 324 casos, 30.5%). En el supuesto de que toda la población consumiera diariamente el agua que suministra el servicio municipal (escenario 2, cuadro 6), el número de casos ascendería a 77 588 por año.

Cuadro 5. Probabilidad de infección anual en San Cristóbal de Las Casas, Chiapas de junio de 2012 a mayo de 2013, debido a *E. coli* O157:H7, *Campylobacter*, rotavirus, *Cryptosporidium*, y según fuente.

Fuente	<i>E. coli</i> O157:H7		<i>Campylobacter</i>		Rotavirus		<i>Cryptosporidium</i>	
	Mediana	Límite superior ^a	Mediana	Límite superior	Mediana	Límite superior	Mediana	Límite superior
Kisst	3.51×10^{-1}	7.80×10^{-1}	1	1	2.24×10^{-3}	6.57×10^{-2}	2.08×10^{-4}	6.12×10^{-3}
La Almolonga	1.69×10^{-1}	6.20×10^{-1}	1	1	9.57×10^{-2}	1.36×10^{-1}	9.74×10^{-3}	1.41×10^{-2}
La Hormiga	5.29×10^{-1}	9.70×10^{-1}	1	1	2.40×10^{-2}	1.17×10^{-1}	2.32×10^{-4}	1.22×10^{-3}
Peje de Oro	6.47×10^{-1}	9.97×10^{-1}	1	1	3.39×10^{-2}	1.78×10^{-1}	3.35×10^{-4}	1.86×10^{-3}
Navajuelos y María Auxiliadora	3.03×10^{-1}	7.37×10^{-1}	1	1	1.17×10^{-2}	4.60×10^{-2}	1.49×10^{-3}	2.95×10^{-3}
Pozo Sta. María	5.48×10^{-2}	7.38×10^{-2}	9.12×10^{-1}	1	1.84×10^{-3}	2.52×10^{-3}	1.77×10^{-5}	2.43×10^{-5}
San Juan de Los Lagos	3.13×10^{-1}	7.32×10^{-1}	1	1	1.23×10^{-2}	4.13×10^{-2}	1.19×10^{-4}	4.19×10^{-4}
Real del Monte, Pedregal y Campanario	2.87×10^{-1}	7.76×10^{-1}	1	1	1.11×10^{-2}	4.86×10^{-2}	1.06×10^{-4}	4.84×10^{-4}
Global	2.98×10^{-1}	8.62×10^{-1}	1	1	1.12×10^{-2}	6.33×10^{-2}	1.09×10^{-4}	6.42×10^{-4}

^aRepresenta el mayor valor esperado, percentil 95.

Cuadro 6. Estimación del número de casos sintomáticos de gastroenteritis, en dos escenarios (fracción de población que declaró tomar agua de la llave sin hervir y total de la población), según fuente y patógeno, de junio de 2012 a mayo de 2013

Fuente	Población expuesta ^a	Casos sintomáticos de gastroenteritis				Total
		<i>E. coli</i> O157:H7	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus	<i>Cryptosporidium</i>	
Escenario 1^b						
Kisst	3414	299	1024	0	0	1324
La Almolonga	2423	102	727	4	17	850
La Hormiga	1762	233	529	1	0	763
Peje de Oro	1762	285	529	1	0	815
Navajuelos y María Auxiliadora	1101	83	330	0	1	415
Pozo Sta. María	330	5	90	0	0	95
San Juan de Los Lagos	110	9	33	0	0	42
Real del Monte, Pedregal y Campanario	110	8	33	0	0	41
Total	11014	1024	3296	6	19	4345
Escenario 2^c	196 687	18 286	58 851	114	337	77 588

^a Estimada a partir del número de usuarios del servicio de agua entubada del SAPAM y asumiendo que 5.6% de la población consume agua de llave y sin hervir.

^b Escenario 1: la población expuesta es sólo el 5.6% que declara tomar agua de llave sin hervir; los días de exposición corresponden al porcentaje de positivos para *E. coli*.

^c Escenario 2: asumiendo a toda la población como expuesta, los días de exposición corresponden al porcentaje de positivos para *E. coli*.

Según los registros, se calculó que en 2013 se atendieron en los servicios de salud públicos un total de 6 896 casos de diarrea en San Cristóbal de Las Casas. Según la Cofepris (2006). En México sólo se reporta uno de cada 19 casos de diarrea, de modo que en 2013 el número total de episodios pudiera considerarse de 131 024.

De acuerdo con la OMS (2004), una mejora del abastecimiento del agua reduce entre 6 y 21% la morbilidad por diarrea, y la mejora de la calidad del agua ingerida mediante el tratamiento del agua doméstica puede reducirla entre un 35 y 39%. Un estudio de Cofepris (2006) sostiene que no hay una estimación rigurosa al respecto en México, y basándose en investigaciones internacionales, propone que la fracción atribuible diarrea/agua sea de 50%. Este último dato puede estar sobreestimado para el caso de San Cristóbal de Las Casas, debido a que se trata de una estimación para todo el país, que incluye zonas urbanas y rurales. Según los resultados de este estudio, de 4 345 casos anuales de gastroenteritis, y la estimación de un total de

131 024 episodios en el año 2013, la fracción de casos de diarrea atribuidos al agua sería de 3.3% ($(131024 / 4345) * 100 = 3.3\%$).

El cuadro 7 resume la carga de enfermedad responsable del consumo del agua del SAPAM utilizando el valor medio (calculado con la probabilidad de infección anual mediana, cuadro 5) y el límite superior (percentil 95) del riesgo de infección del total de las fuentes (cuadro 4) en los dos escenarios. Para 5.6% de la población que reportó tomar agua de llave sin hervir, la carga de enfermedad en AVAD causada por *E. coli* O157:H7, *Campylobacter*, rotavirus y *Cryptosporidium* fue, respectivamente, 1.51×10^{-3} , 8.84×10^{-4} , 4.77×10^{-6} , 4.60×10^{-8} , AVAD por persona y año. La suma de la carga de enfermedad fue de 2.40×10^{-3} AVAD por persona y año. Según la OMS, un nivel de riesgo de 10^{-6} AVAD por persona y año es tolerable para el agua potable. Aplicando esta referencia, la carga de enfermedad del consumo del agua distribuida por el SAPAM supera el nivel establecido en varios órdenes de magnitud en el caso de *E. coli*

Cuadro 7. Evaluación del riesgo de E. coli O157:H7, Campylobacter, rotavirus y Cryptosporidium, en dos escenarios (fracción de población que declaró tomar agua de la llave y total de la población).

Riesgo	<i>E. coli</i> O157:H7	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus	<i>Cryptosporidium</i>
Calidad del agua bruta (C_R) ^a	1.24	8.05	1.55×10^{-4}	1.55×10^{-5}
Eficacia del tratamiento (P_T) ^b	0	0	0	0
Calidad del agua ingerida (C_D)	1.24	8.05	1.55×10^{-4}	1.55×10^{-5}
Consumo de agua no hervida (V) ^c	1.8 (1-2.9)	1.8 (1-2.9)	1.8 (1-2.9)	1.8 (1-2.9)
Exposición por agua ingerida, organismos por litro (E)	2.23	14.50	2.79×10^{-4}	2.79×10^{-5}
Riesgo de infección anual ($P_{inf,y}$) ^d	2.98×10^{-1}	1	1.12×10^{-2}	1.09×10^{-4}
Riesgo de enfermedad diarreica, habiéndose producido la infección ($P_{inf/ill}$) ^e	0.25	0.3	0.3	0.7
Riesgo de enfermedad diarreica (P_{ill})	7.45×10^{-2}	3×10^{-1}	3.39×10^{-3}	7.64×10^{-5}
Carga máxima de enfermedad (mdb)	3.62×10^{-1}	5.26×10^{-2}	4.30×10^{-1}	1.07×10^{-2}
Proporción de la población susceptible (f_s)	5.6%	5,6%	0.3% ^f	5.6%
Carga de enfermedad (AVAD)				
Escenario 1^g				
Valor medio ^h	1.51×10^{-3}	8.84×10^{-4}	4.77×10^{-6}	4.60×10^{-8}
Límite superior ⁱ	4.36×10^{-3}	8.84×10^{-4}	2.69×10^{-5}	2.71×10^{-7}
Escenario 2				
Valor medio	2.69×10^{-2}	1.58×10^{-2}	8.53×10^{-5}	8.21×10^{-7}
Límite superior	7.79×10^{-2}	1.58×10^{-2}	4.84×10^{-4}	4.83×10^{-6}

^a Microorganismos l⁻¹.^b Sin tratamiento.^c Media y rango de volumen de ingesta diaria de agua (l/día).^d Valor medio (percentil 50).^e *E. coli* O157:H7 (Howard et al., 2006); *Campylobacter* (OMS, 2012); rotavirus (Hernández et al., 2011); *Cryptosporidium* (Havelaar & Melse, 2003) (OMS, 2012).^f Población menor de cinco años.^g Escenario 1: la población expuesta es sólo de 5.6% que declara tomar agua de la llave sin hervir; los días de exposición corresponden al porcentaje de positivos para *E. coli*; Escenario 2: asumiendo a toda la población como expuesta, los días de exposición corresponden al porcentaje de positivos para *E. coli*.^h Calculado con la probabilidad de infección anual mediana (cuadro 5).ⁱ Calculado con el percentil 95 de la probabilidad de infección anual (cuadro 5).

O157:H7 y *Campylobacter*, y roza el límite en el caso del rotavirus. Si el 100% de la población consumiera el agua de llave sin hervir, el riesgo ascendería dos órdenes de magnitud en el caso del *Campylobacter* y un orden de magnitud en el resto de patógenos (*E. coli* O157:H7 2.69×10^{-2} ; *Campylobacter* 1.58×10^{-2} ; rotavirus 8.53×10^{-5} , y *Campylobacter* 8.21×10^{-7}). Esto supone una amenaza para la salud de la población de San Cristóbal de Las Casas y, por lo tanto, plantea la necesidad de reducir este riesgo.

Discusión

Calidad del agua del Sistema Municipal de Agua, SAPAM

El presente estudio ha demostrado que el agua distribuida por el SAPAM no es apta para consumo humano. Los hallazgos obtenidos revelan un nivel elevado de contaminación en todas las fuentes de abastecimiento. Dicha contaminación es destacable en tres aspectos:

frecuencia, magnitud y diferencias, tanto de frecuencia como de magnitud, según fuente de abastecimiento.

Entre los resultados obtenidos destaca que al menos una de las muestras de agua analizadas en todas las fuentes de la ciudad presentaba contaminación bacteriológica. El 59% de las muestras fue positiva para coliformes totales y 32% para *E. coli*. Esta cifra es coherente con la realidad del país, pues en la Ciudad de México, que quizá sea el lugar donde se realice un monitoreo más intenso del agua y el servicio sea más controlado, en 2002 se encontró que 29% del agua no cumplía con los parámetros microbiológicos (Marañón, 2008). Según las Guías para el Agua Potable de la OMS (2008), en una localidad de más de 100 000 habitantes, como es el caso de San Cristóbal de Las Casas, el agua de la red de distribución que presente más de 15% de las muestras positivas para *E. coli* en el monitoreo de sus aguas entra en la categoría de “calidad pobre”, la más baja.

Los niveles de contaminación son muy elevados para el agua destinada al consumo humano. Las concentraciones entre las que oscila la contaminación fecal están clasificadas por la OMS (2008) como de riesgo alto y muy alto para la salud (100-1000 UFC/100 ml riesgo alto, y > 1000 UFC/100 ml riesgo muy alto).

Las diferencias observadas de frecuencia y concentración de la CBA entre las distintas fuentes analizadas visibilizan la desigualdad en cuanto a la exposición microbiológica y, por consiguiente, al riesgo para la salud entre barrios y colonias de la ciudad. Aun con dichas diferencias, dos de las fuentes analizadas (La Kisst y Peje de Oro) que abastecen a 47% de la población, fueron las que tuvieron el mayor porcentaje de muestras con contaminación fecal.

Para garantizar la inocuidad microbiana del abastecimiento del agua de consumo humano es necesaria la implementación y aplicación de barreras múltiples desde la cuenca de captación y manantiales hasta las personas consumidoras que eviten la contaminación del agua de consumo o la reduzcan a niveles no perjudiciales para la salud (OMS, 2008). Tanto la infraestructura

como la gestión del SAPAM carecen de las barreras fisicoquímicas y capacidad necesarias para garantizar una buena calidad del agua que suministra.

En primer lugar, San Cristóbal de Las Casas se asienta en una cuenca endorreica, es decir, el agua no tiene salida fluvial hacia el océano y sólo puede abandonar el sistema por filtración o evaporación. Para el caso de San Cristóbal, además se cuenta con un túnel de avenamiento de 4.2 km de longitud para el drenaje de las aguas. La ciudad no cuenta con planta de tratamiento de aguas residuales, por lo que las descargas de este tipo de aguas, así como las pluviales, son vertidas directamente a los ríos. Al tratarse de un sistema de drenaje interno es más sensible a la contaminación y las fuentes no están lo suficientemente protegidas. En segundo lugar, el único tratamiento que se lleva a cabo es la desinfección química con cloro, y éste no se realiza de manera adecuada. Según fuentes del SAPAM (2011), no se cloran todos los tanques ni se cuenta con insumos suficientes para clorar todos los días. La contaminación bacteriana encontrada en el agua evidencia la irregularidad con la que se está realizando este tratamiento. En tercer lugar, la mala gestión del sistema de distribución (tuberías, tanques de almacenamiento y distribución por tandeo) supone un riesgo de recontaminación microbiológica del agua dentro de la red. En el monitoreo del agua del SAPAM (Ecosur, 2012), del cual se extrajeron los datos para este estudio, se tomaron muestras de agua tanto de los tanques y cárcamos de bombeo como de las fuentes (manantiales). En varios tanques se encontraron concentraciones de contaminación fecal más elevadas que las fuentes, lo cual es consistente con otros estudios (Oswald et al., 2007; Quick et al., 1999; Jersen et al., 2002; Machdar et al., 2013; Howard et al., 2006, 2007), que afirman que este problema de contaminación después de la fuente se experimenta con frecuencia en los países que tienen sistemas de agua como las de San Cristóbal de Las Casas.

La frecuencia en el suministro del agua de manera intermitente es un problema extendido

en todo México, pues sólo 44.7% de la población del país cuenta con servicio continuo de agua entubada (Marañón, 2008). Ello también supone un riesgo, por dos motivos: por un lado, es necesario que cada vivienda cuente con algún tipo de sistema de almacenamiento de agua, lo que puede resultar ser una fuente de recontaminación por falta de mantenimiento de los tanques; por otro lado, una gran parte del tiempo las tuberías están vacías o medio llenas, lo que permite el crecimiento de *biofilms* (Szewzyk, Szewzyk, Manz, & Schleifer, 2000).

Evaluación del riesgo

La ECRM realizada en el presente estudio proporciona una primera estimación del riesgo para la salud de la población por contaminantes microbianos del agua distribuida por el SAPAM en San Cristóbal de Las Casas. No obstante, dada la limitación de datos, presenta ciertas limitaciones que deben mencionarse:

1. En ausencia de datos censales poblacionales que permitan el análisis del riesgo por fuente de abastecimiento se utilizaron los datos de personas usuarias del servicio de agua entubada del SAPAM. En teoría, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) es el organismo encargado de llevar las estadísticas de población en todo el país a través de los censos de población (el más reciente de ellos llevado a cabo en 2010). Sin embargo, en el caso de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas, hay colonias para las cuales el INEGI (2010) no tiene censada a persona alguna, por lo que los datos del SAPAM parecen acercarse más a la realidad. No obstante, éste tampoco recoge el total de la población, por lo cual se espera que el cálculo del número de casos de gastroenteritis pueda estar subestimado.
2. El riesgo de infección también puede haber sido subestimado debido a la asunción de que no existía exposición a ninguno de los patógenos en las muestras de agua que fueron negativas para *E. coli*. La ausencia

de este indicador no es garantía de la desaparición de agentes patógenos fecales (Van Lieverloo, Blokker, & Medema, 2007). Esto puede haber tenido más repercusión en los resultados del rotavirus y del *Cryptosporidium*, por presentar mayor resistencia a la desinfección con cloro, sobre todo en el caso de *Cryptosporidium* (Ashbolt, 2004; Machdar et al., 2013; Aström, Pettersson, Bergstedt, Pettersson, & Stenström, 2007; OMS, 2008). Hay estudios que demuestran que las bacterias pueden resistir a la desinfección mediante la protección dentro de los *biofilms* y células huésped resistentes (Berry, Xi, & Raskin, 2006), por lo que tampoco puede descartarse la subestimación del riesgo del *Campylobacter*.

3. El uso de razones *E. coli*: patógenos para estimar la concentración de los microorganismos podría sobreestimar o subestimar el riesgo, pues la relación puede ser diferente, dependiendo del tipo de agua y condiciones ambientales. En este estudio se utilizaron razones de aguas residuales para *Cryptosporidium* y rotavirus (Howard et al., 2007), y de agua cruda (agua potable antes de ser tratada) para *Campylobacter* (Smeets, 2008). Especialmente para *Campylobacter* estas proporciones son muy diferentes entre aguas residuales y agua potable (Machdar et al., 2013), pudiendo llegar hasta una diferencia de seis grados de magnitud (Pettersson, Signor, Ashbolt, & Roser, 2006). Ello demuestra la importancia de tener estimaciones fiables de estas razones para los diferentes tipos de agua, así como las limitaciones del enfoque (Pettersson et al., 2006; Van Lieverloo et al., 2007). La variabilidad de la relación entre *E. coli* y los patógenos se origina principalmente por la condición de salud del huésped que excreta, la persistencia en el medio ambiente y en la red de distribución, y el tipo de fuente de contaminación (Van Lieverloo et al., 2007). Desafortunadamente, no hay datos microbiológicos disponibles del área

estudiada. No obstante, a pesar de estas incertidumbres, los resultados de este estudio están en línea con Westrell (2004), quien calculó que el riesgo de infección por *Cryptosporidium* es menor en comparación con el rotavirus y *Campylobacter* para el agua potable en Suecia. Por otra parte, aunque la relación no puede predecir con exactitud el riesgo para la salud de cada patógeno en específico, debería proporcionar una estimación razonable de la carga global de enfermedad derivada de cada grupo de microorganismo al que representan (Howard et al., 2006).

4. El hecho de que la ECRM se haya realizado a partir de los datos del agua de los tanques de almacenamiento y no de muestras de agua intradomiciliaria (el último punto hasta las personas consumidoras) puede haber supuesto una subestimación del riesgo. Según Howard et al. (2006), la recontaminación del agua en los hogares puede llegar a incrementar en un orden de magnitud la carga de enfermedad y en dos la probabilidad de enfermar de diarrea.
5. Para el cálculo de los años de vida perdidos (AVP) por muerte prematura se utilizaron registros oficiales de morbilidad y mortalidad, los cuales se conoce que puedan estar subregistrados y/o contar con errores de registro. Las incertidumbres asociadas con estos datos influyen de manera directa en el cálculo de la carga de enfermedad (AVAD), por lo que los resultados pueden estar subestimados también por esta cuestión.

En ese sentido, los resultados estimados a partir de los datos epidemiológicos proporcionados por fuentes oficiales sugieren que el riesgo calculado en la presente ECRM puede estar subestimado.

A pesar de las limitaciones señaladas, este estudio evidencia la necesidad de inversiones futuras en la mejora del sistema de abastecimiento de agua, que se traduzcan en un beneficio para la salud de la población.

Los datos sobre probabilidad de infección muestran que la concentración de la contaminación tiene mayor influencia en el riesgo para la salud que la frecuencia con la que ocurre dicha contaminación. Los resultados de este estudio coinciden con los de Hunter et al. (2009), quienes demostraron que incluso un par de días de interrupción en el suministro de agua segura pueden ser suficientes para acabar con el beneficio para la salud pública que supone contar con provisión de agua potable. Debido a ello han sugerido que cualquier intervención no fiable al 100% no logrará los beneficios sanitarios esperados.

En San Cristóbal de Las Casas sólo se lleva a cabo la desinfección con cloro. En el supuesto de que ésta se realizara de forma adecuada (todos los días, en todas las fuentes y con la cantidad necesaria), teniendo en cuenta la eficacia del tratamiento marcado según Westrell (2004) y asumiendo el consumo de agua del SAPAM por parte de toda la población, se esperaría tener 3 313 casos de gastroenteritis al año. La probabilidad de infección anual descendería prácticamente hasta un nivel de 10^{-4} en todos los patógenos, excepto en el *Campylobacter* (*E. coli* O157:H7, 2.96×10^{-4} ; *Campylobacter*, 1.68×10^{-2} ; rotavirus, 3.02×10^{-4} ; y *Cryptosporidium*, 1.31×10^{-4}). La carga de enfermedad en AVAD sería de 2.68×10^{-5} para el *E. coli* O157:H7; 2.66×10^{-4} para el *Campylobacter*; 2.31×10^{-6} para el rotavirus, y 9.85×10^{-7} para el *Cryptosporidium* (tabla 8). Estos resultados confirman que la desinfección química, aun constituyendo una barrera eficaz para numerosos patógenos, no garantiza necesariamente la seguridad de la calidad en el suministro. Una gestión eficaz debería añadir barreras múltiples, como operaciones de tratamiento adecuadas y la protección del agua tanto en la fuente de origen como durante su almacenamiento y distribución (OMS, 2008). La estrategia recomendada es un sistema de gestión que haga hincapié en la prevención o reducción de la entrada de microorganismos a los recursos hídricos y que reduzca la dependencia en las operaciones de tratamiento para la eliminación

Cuadro 8. Evaluación del riesgo de *E. coli* O157:H7, *Campylobacter*, rotavirus y *Cryptosporidium* con tratamiento adecuado de cloración.

	<i>E. coli</i> O157:H7	<i>Campylobacter</i>	Rotavirus	<i>Cryptosporidium</i>
Calidad del agua bruta (C_R) ^a	1.24	8.05	1.55×10^{-4}	1.55×10^{-5}
Eficacia del tratamiento (P_T) ^b	3.5 (2.5-5)	3.5 (2.5-5)	2 (1.5-3)	0.4 (0-1)
Calidad del agua ingerida (C_D)	3.92×10^{-4}	2.55×10^{-3}	1.55×10^{-6}	6.17×10^{-6}
Consumo de agua no hervida (V) ^c	1.8 (1-2.9)	1.8 (1-2.9)	1.8 (1-2.9)	1.8 (1-2.9)
Exposición por agua ingerida, organismos por litro (E)	7.05×10^{-4}	4.58×10^{-3}	2.79×10^{-6}	1.11×10^{-5}
Riesgo de infección anual ($P_{inf,y}$)	2.96×10^{-4}	1.68×10^{-2}	3.02×10^{-4}	1.31×10^{-4}
Riesgo de enfermedad diarreica habiéndose producido la infección ($P_{inf/ill}$) ^d	0.25	0.3	0.3	0.7
Riesgo de enfermedad diarreica (P_{ill})	7.41×10^{-5}	5.05×10^{-3}	9.06×10^{-5}	9.17×10^{-5}
Carga máxima de enfermedad (mdb)	3.62×10^{-1}	5.26×10^{-2}	4.30×10^{-1}	1.07×10^{-2}
Proporción de la población susceptible (f_s)	100%	100%	5.9% ^e	100%
Carga de enfermedad (AVAD)				
Valor medio ^f	2.68×10^{-5}	2.66×10^{-4}	2.31×10^{-6}	9.85×10^{-7}
Límite superior ^g	3.02×10^{-4}	2.65×10^{-3}	1.76×10^{-5}	6.44×10^{-6}

^a Microorganismos l⁻¹.

^b Mediana y rango de la eliminación en log10 de los microorganismos en el proceso de tratamiento de agua potable con cloro. Referente a los patógenos *Campylobacter*, rotavirus y *Cryptosporidium*. Westrell (2004).

^c Media y rango de volumen de ingesta diaria de agua (l/día).

^d *E. coli* O157:H7 (Howard et al., 2006); *Campylobacter* (OMS 2012); rotavirus (Hernández-Cortez et al., 2011); *Cryptosporidium* (Havelaar & Melse, 2003) (OMS, 2012).

^e Población menor de cinco años.

^f Calculado con la probabilidad de infección anual mediana (cuadro 5).

^g Calculado con el percentil 95 de la probabilidad de infección anual (cuadro 5).

de patógenos. Se recomienda también monitoreo a lo largo de la red de distribución para detectar los puntos críticos de recontaminación del sistema y las oportunidades para reclarar el agua o aplicar algún otro tipo de desinfección complementaria.

La ECRM de este estudio indica la carga de enfermedad presente de cada patógeno de referencia. Estos datos pueden utilizarse en futuros estudios para calcular el rendimiento necesario del tratamiento del agua y el sistema de distribución, a fin de reducir la contaminación hasta niveles seguros para la salud de la población.

Desigualdad del riesgo

La evaluación cuantitativa del riesgo es una ciencia relativamente reciente, que apenas cuenta con tres décadas (NRC, 1983). Ha recibido

críticas por tener la limitación de no visibilizar todas las dimensiones del riesgo, entre ellas las ligadas con las desigualdades de exposición ambiental entre subgrupos de una población. Por tanto, y con intención de no agravar la situación de injusticia ambiental debido a al carácter conservador y simplista de esta técnica, se introdujo un análisis de la exposición y del riesgo según fuente de abasto (Kuehn, 1996).

La diferencia en la CBA y la heterogeneidad con la que se lleva a cabo la desinfección con cloro en las ocho fuentes se traduce en una desigualdad de la exposición microbiológica del agua entre las colonias de la ciudad (cuadro 3). La incertidumbre introducida por contar con escasos datos de monitoreo, en especial de medición de la frecuencia, dificulta cuantificar la magnitud de dicha desigualdad, en términos de riesgo para la salud. En consecuencia,

la diferencia de la probabilidad de infección anual entre las distintas fuentes analizadas podría estar subestimada. De todas maneras, es evidente que el riesgo no es homogéneo para toda la población. Estas diferencias serían más notables si se realizara un análisis más detallado por fuente, contando con variables como el porcentaje de población que consume agua sin hervir, volumen de ingesta diario y número de población susceptible, entre otros indicadores.

El presente estudio sólo evaluó el riesgo derivado del consumo de agua del SAPAM, por lo que parte de la población (alrededor de 6.12%) quedó fuera del análisis. Al abastecerse de fuentes de la misma cuenca, estimamos que los riesgos para esta población son parecidos a los obtenidos. Incluso así, se recomiendan futuras investigaciones que evalúen estos sistemas independientes de agua.

De acuerdo con la información disponible (Ecosur, 2013), es muy poca la población de San Cristóbal de Las Casas que consume agua de la llave sin hervir, 5,6%. Esta desconfianza ha propiciado, junto con otros factores, el incremento del consumo de agua embotellada (Haro *et al.*, 2012). Un estudio de mercado realizado por Consulta Mitofsky (2006) evidenció que la principal razón para el consumo de agua embotellada es la desconfianza en la calidad del agua de la llave, convirtiendo a México en el segundo país con mayor consumo de agua envasada per cápita en el mundo, según datos de la ONU de 2004 (Marañón, 2008). El consumo de agua embotellada incrementa considerablemente el gasto familiar, además de que no proporciona una seguridad para la salud. En México existen alrededor de 6 500 empresas productoras de agua, de las cuales 2 500 se consideran “informales”, es decir, que operan fuera de las normas sanitarias establecidas por el país (Haro *et al.*, 2012; Marañón, 2008), con los consecuentes riesgos que ello representa.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran que el sistema de abastecimiento de agua de la ciudad

de San Cristóbal de Las Casas representa un serio peligro para la salud de sus habitantes. La probabilidad de infección anual está por encima del valor de referencia de la EPA para cada patógeno analizado, y la suma de la carga de enfermedad medida en AVAD por persona y año también se encuentra mucho más elevada que el nivel de referencia recomendado por la OMS. Se apreciaron desigualdades en el riesgo para la salud de la población según fuente de abastecimiento. Debido a todo ello, es necesario y urgente mejorar la calidad microbiológica del agua del SAPAM.

Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco de una tesis de Maestría de Salud Pública de la Universidad Pompeu Fabra de Barcelona, España; en colaboración con El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), México, y el Centro de Investigación en Epidemiología Ambiental (CREAL), en España. Los autores agradecemos a: los Laboratorios Institucionales de la Unidad San Cristóbal de El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur), por haber facilitado los datos de monitoreo de agua del SAPAM y la encuesta de hábitos del agua doméstica de la población de San Cristóbal de Las Casas; a la Secretaría de Salud (SSA), al Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) y al Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE), por la facilitación de los datos epidemiológicos que tenían disponibles requeridos para este estudio; a la doctora María Inés Navarro González, de la Universidad Nacional Autónoma de México, por sus invaluable comentarios en el enfoque de la metodología y estrategia de análisis llevados a cabo en este trabajo, y a la Dra. Cristina Villanueva, del CREAL, por su asesoramiento en el estado del arte de la problemática estudiada.

Referencias

- Ashbolt, N. J. (2004). Microbial contamination of drinking water and disease outcomes in developing regions. *Toxicology*, 198(1-3), 229-238, DOI: 10.1016/j.tox.2004.01.030.
- Aström, J., Pettersson, S., Bergstedt, O., Pettersson, T. J. R., & Stenström, T. (2007). Evaluation of the microbial risk reduction due to selective closure of the raw water intake before drinking water treatment. *Journal of Water and Health*, 5(1), 81-97, DOI: 10.2166/wh.2007.139.

- Bencala, K. et al. (2006). *Desarrollo de un plan de administración sostenible para la cuenca de San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, México*. Tesis de Maestría. Santa Bárbara, EUA: University of California.
- Benke, K. K., & Hamilton, A. J. (2007). Quantitative microbial risk assessment: Uncertainty and measures of central tendency for skewed distributions. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(4), 533-539, DOI: 10.1007/s00477-007-0171-9.
- Berry, D., Xi, C., & Raskin, L. (2006). Microbial ecology of drinking water distribution systems. *Current Opinion in Biotechnology*, 17(3), 297-302, DOI: 10.1016/j.copbio.2006.05.007.
- Black, R. E., Levine, M. M., Clements, M. L., Hughes, T. P., & Blaser, M. J. (1998). Experimental *Campylobacter jejuni* infection in humans. *The Journal of infectious diseases*, 177(3), 472-479. Recovered from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/3343522>.
- CAMRA (2013). *Theory and practice of quantitative microbial risk assessment: An introduction*. Center for Advancing Microbial Risk Assessment. Recovered from http://qmrawiki.msu.edu/images/6th_QMRA_Manual_2013.pdf.
- CENSIDA (2013). *Vigilancia epidemiológica de casos de VIH/SIDA en México. Registro Nacional de Casos de SIDA*. Centro Nacional para la Prevención y Control del SIDA. Recovered from http://www.censida.salud.gob.mx/descargas/epidemiologia/RN_CIERRE_2013.pdf.
- Cofepris (2006). El subregistro en enfermedades diarreicas. *Revista Red*. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. Recovered en http://189.254.115.246/RevistaRED/portada2006enero/num4_art_4.htm.
- Cofepris (2008). La prevención de daños evitables a la salud en México: una evaluación de la gestión del desempeño de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris). Recovered de http://portal.salud.gob.mx/codigos/columnas/evaluacion_programas/pdf/EXT08_COFEPRIS_IF.pdf.
- Conagua (2011). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Recovered de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SGAPDS-INVENTARIO%202011%20FINAL.pdf>.
- Consulta Mitofsky (2006). *Consumo de agua. Estudio de opinión*. México, DF: Consulta Mitofsky.
- Dupont, H. L., Hornick, R. B., Snyder, M. J., Libonati, J. P., Formal, S. B., & Gangarosa, E. J. (1975). Immunity in shigellosis. II. Protection induced by oral live vaccine or primary infection. *The Journal of Infectious Diseases*, 125(1), 12-16, DOI: 10.1093/infdis/125.1.12.
- Ecosur (2013). *Base de datos de la encuesta "Agua doméstica en San Cristóbal de Las Casas"*. San Cristóbal de Las Casas, Méxco: El Colegio de la Frontera Sur.
- Ecosur (2012). *Base de datos del monitoreo del agua del SAPAM*. San Cristóbal de Las Casas, Méxco: El Colegio de la Frontera Sur.
- Gortáres-Moroyoqui, P., Castro-Espinoza, L., Navarro, J. E., Karpiscak, M. M., Freitas, R. J., & Gerba, G. P. (2011). Microbiological water quality in a large irrigation system: El Valle del Yaqui, Sonora México. *Journal of Environmental Science and Health*, 46(14), 1708-1712, DOI: 10.1080/10934529.2011.623968.
- Grijalva-Haro, M. I., Barba-Leyva, M. E., & Laborín-Alvarez, A. (2001). Ingestión y excreción de fluoruros en niños de Hermosillo, Sonora, México. *Salud Pública de México*, 43(2), 127-134. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/spm/v43n2/a08v43n2.pdf>.
- GWW (2010). *Manual de monitoreo comunitario del agua: monitoreo bacteriológico y físico químico* (90 pp.). Alabama: Global Water Watch.
- Haro, J. A., Nubes, G., & Calderón, J. R. (2012). Riesgos sanitarios en calidad bacteriológica del agua. Una evaluación en diez estados de la república mexicana. *Región y Sociedad*, 3, 257-288. Recuperado en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10223024008>.
- Hass, C. N., Rose, J. B., & Gerba, C. P. (1999). *Quantitative microbial risk assessment*. New York: Wiley.
- Hass, C., Rose, J., Weir, M. H., Gurian, P., & Mitchell, J. (2014). *Quantitative microbial risk assessment wiki*. Recovered from [http://qmrawiki.msu.edu/index.php?title=Quantitative_Microbial_Risk_Assessment_\(QMRA\)_Wiki](http://qmrawiki.msu.edu/index.php?title=Quantitative_Microbial_Risk_Assessment_(QMRA)_Wiki).
- Havelaar, A. H., & Melse, J. M. (2003). Quantifying public health risk in the WHO guidelines for drinking water quality: A burden of disease approach. Recovered from http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/rivmrep.pdf?ua=1.
- Hernández-Cortez, C., Aguilera-Arreola, M. G., & Castro-Escarpili, G. (2011). Situación de las enfermedades gastrointestinales en México. *Enfermedades Infecciosas y Microbiología*, 31(4), 137-151. Recuperado en http://www.amimc.org.mx/revista/2011/31_4/situacion.pdf.
- Howard, G., Feroze-Ahmed, M., Gaifura-Mahmud, S., Teunis, P., Davison, A., & Deere, D. (2007). Disease burden estimation to support policy decision-making and research prioritization for arsenic mitigation. *Journal of Water and Health*, 5(1), 67, DOI: 10.2166/wh.2006.056.
- Howard, G., Pedley, S., & Tibatemwa, S. (2006). Quantitative microbial risk assessment to estimate health risks attributable to water supply: Can the technique be applied in developing countries with limited data? *Journal of Water and Health*, 4, 49-64, DOI: 10.2166/wh.2005.058.
- Hunter, P. R., Zmirou-Navier, D., & Hartemann, P. (2009). Estimating the impact on health of poor reliability of drinking water interventions in developing countries. *The Science of the Total Environment*, 407(8), 2621-2624, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.01.018.

- Hunter, P. R., Anderle de Saylor, M., Risebro, H. L., Nichols, G. L., Kay, D., & Hartemann, P. (2011). Quantitative microbial risk assessment of *Cryptosporidiosis* and *Giardiasis* from very small private water supplies. *Risk Analysis*, 31(2), 228-236, DOI: 10.1111/j.1539-6924.2010.01499.x.
- INEGI (2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/proyectos/ccpv/cpv2010/Default.aspx>.
- INEGI (2012). *Estadísticas de mortalidad*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/olap/proyectos/bd/consulta.asp?p=mortgral&c=33465&s=est&cl=4#>.
- INEGI (2013). *Estadísticas a propósito del Día de Muertos, datos de Chiapas*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/muertos0.pdf>.
- INIFAP (2012). *Manejo sustentable de los recursos naturales en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, Chiapas Manejo sustentable de los recursos naturales en la cuenca de San Cristóbal de las Casas, Chiapas* (180 pp.). México, DF: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias,
- Jersen, P. K., Ensink, J. H. J., Jayasinghe, G., Van der Hoek, W., Cairncross, S., & Dalsgaard, A. (2002). Domestic transmission routes of pathogens: The problem of in-house contamination of drinking water during storage in developing countries. *Tropical Medicine & International Health*, 7(7), 604-609. Recuperado en <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12100444>.
- Kuehn, R. R. (1996). The environmental justice implications of quantitative risk assessment. *University of Illinois Law Review*, 1996(103), 103-172. Recovered from <http://heinonline.org/HOL/LandingPage?handle=hein.journals/unillr1996&div=10&id=&page=>.
- Labite, H., Lunani, I., Van der Steen, P., Vairavamoorthy, K., Drechsel, P., & Lens, P. (2010). Quantitative microbial risk analysis to evaluate health effects of interventions in the urban water system of Accra, Ghana. *Journal of Water and Health*, 8(3), 417-430, DOI: 10.2166/wh.2010.021.
- Machdar, E., Van der Steen, N. P., Raschid-Sally, L., & Lens, P. N. L. (2013). Application of quantitative microbial risk assessment to analyze the public health risk from poor drinking water quality in a low income area in Accra, Ghana. *The Science of the Total Environment*, 449, 134-142, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.01.048.
- Mara, D. D., Sleight, P. A., Blumenthal, U. J., & Carr, R. M. (2007). Health risks in wastewater irrigation: Comparing estimates from quantitative microbial risk analyses and epidemiological studies. *Journal of Water and Health*, 5(1), 39, DOI: 10.2166/wh.2006.055.
- Marañón, B. (2008). *Los costos económicos en salud asociados al deficiente servicio de agua potable: el caso de las enfermedades diarreicas en México* (73 pp.). Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua. Recuperado de http://www.agua.org.mx/h2o/index.php?option=com_content&view=article&id=7040:costos-economicos-en-salud-asociados-al-deficiente-servicio-potable&catid=1290:enfermedades&Itemid=100148.
- Messner, M. J., Chappell, C. L., & Okhuysen, P. C. (2001). Risk assessment for *Cryptosporidium*: A hierarchical Bayesian analysis of human dose response data. *Water Research*, 35(1)6, 3934-3940. Recovered from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12230176>.
- Navarro, I., Maya, C., & Lucario, E. S. (September, 2007). *Assessment of potencial cancer risks from trihalomethanes in water supply at Mexican rural communities*. International Symposium on New Directions in Urban Water Management, Paris.
- NRC (1983). *Risk Assessment in the federal government: Managing the Process*. National Research Council. Recovered from <http://www.epa.gov/region9/science/seminars/2012/red-book.pdf>.
- OMS (2004). *Relación del agua, el saneamiento y la higiene con la salud*. Organización Mundial de la Salud. Recuperado de http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/facts2004/es/.
- OMS (2003). *Domestic water quantity, service level and health*. Recovered from http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/wsh0302/en/.
- OMS (2008). *Guidelines for drinking water quality*. Second addendum to third edition. Volume 1 Recommendations. Recovered from http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/secondaddendum20081119.pdf.
- OMS (2012) *Evaluación de métodos para el tratamiento doméstico del agua: metas sanitarias y especificaciones de eficiencia microbiológica*. Organización Mundial de la Salud. Recuperado de: http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2011/household_water/es/
- Oswald, W. E., Lescano, A. G., Bern, C., Calderon, M. M., Cabrera, L., & Gilman, R. H. (2007). Fecal contamination of drinking water within peri-urban households, Lima, Peru. *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 77(4),699-704. Recovered from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17978074>.
- Petterson, S., Signor, R., Ashbolt, N., & Roser, D. (2006). *QMRA methodology*. Recovered from http://www.microrisk.com/uploads/microrisk_qmra_methodology.pdf.
- Quick, R., Venczel, L., Mintz, E., Soletto, L., Aparicio, J., Gironaz, M., Hutwagner, L., Greene, K., Bopp, C., Maloney, K., Chavez, D., Sobsey, M., & Tauxe, R. (1999). Diarrhea prevention in Bolivia through point-of-use disinfection and safe storage: A promising new strategy. *Epidemiology and Infection*, 122, 83-90. Recovered from http://www.cdc.gov/safewater/publications_pages/1999/quick_1999.pdf.
- Sánchez-Pérez, H. J., Vargas-Morales, M. G., & Méndez-Sánchez, J. D. (2000). Calidad bacteriológica del agua

para consumo humano en zonas de alta marginación de Chiapas. *Salud Pública de México*, 42(5), 397-406. Recuperado en <http://www.scielosp.org/pdf/spm/v42n5/3990.pdf>.

SAPAM (2011). *Manantiales y sistemas de bombeo*. Documento interno del SAPAM. San Cristóbal de Las Casas, Méxco: Sistema de Agua Potable y Alcantarillado Municipal.

Sinave (2012). *Perfil epidemiológico de las enfermedades infecciosas intestinales* (90 pp.). México DF: Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica. Recuperado de http://epidemiologiatlax.files.wordpress.com/2012/10/infecciosas-intestinales_junio12.pdf.

Smeets, P. (2008). Stochastic modeling of drinking water treatment in Quantitative Microbial Risk Assessment. Delf, Holanda: Water Management Academic Press. Recovered from http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_watermanagement/Secties/gezondheidstechniek/leerstoelen/Drinkwater/Research/Completed_PhD_projects/doc/PhD-Thesis_PWMH_Smeets.pdf.

SSA (2012). *Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2012 (ENSANUT). Vacunación en niños: hacia un mejor registro y la aplicación sin restricciones*. México, DF: Secretaría de Salud. Recuperado de <http://ensanut.insp.mx/doctos/analiticos/VacunacionNinos.pdf>.

Staat, M. A., Payne, D. C., Donauer, S., Weinberg, G., Edwards, K. M., Szilagyi, P.G. et al. (2011). Effectiveness of pentavalent rotavirus vaccine against severe disease. *Pediatrics*, 128(2), 267-275, DOI: 10.1542/peds.2010-3722.

Stevens, G. et al. (2008). Characterizing the epidemiological transition in Mexico: National and subnational burden of diseases, injuries, and risk factors. *PLoS Medicine*, 5(6), 125, DOI: 10.1371/journal.pmed.0050125.

Szewzyk, U., Szewzyk, R., Manz, W., & Schleifer, K. H. (2000). Microbial safety of drinking water. *Annual Rev. Microbiol.*, 54, 81-127.

Teunis, P. F. M., Medema, G. J., Kruidenier, L., & Havelaar, A. H. (1998). Assessment of the risk of infection by *Cryptosporidium* or *Giardia* in drinking water from a surface water source. *Water Research*, 31(6), 1333-1346, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2009.01.018.

Van Lieverloo, J. H. M., Blokker, E. J. M., & Medema, G. (2007). Quantitative microbial risk assessment of distributed drinking water using faecal indicator incidence and concentrations. *Journal of Water and Health*, 5(1), 131-149, DOI: 10.2166/wh.2007.134.

Ward, R. L., Bernstein, D. I., Young, E. C., Sherwood, J. R., Knowlton, D. R., & Schiff, G. M. (1986). Human rotavirus studies in volunteers: Determination of infectious dose and serological response to infection. *J. Infect. Dis.*, 154(5), 871-880.

Westrell, T. (2004). *Microbial risk assessment and its implications for risk management in urban water systems* (84 pp.). Linköping, Switazarland: Linköping Studies in Arts

and Science, Linköping University. Recovered from <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:20794/FULLTEXT01.pdf>.

Dirección institucional de los autores

M.S.P. Ane Galdos-Balzategui

Fundación Cántaro Azul A.C.
Coordinación del área de Gestión del Conocimiento
Daniel Sarmiento 19-A, Los Alcanfores
29246 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO
Teléfono: +52 (967) 1391 026
ane@cantaroazul.org

Lic. Jesús Carmona de la Torre

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)
Unidad San Cristóbal de Las Casas
Laboratorios Institucionales
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO
Teléfono: +52 (967) 6749 000, ext. 1800
jcarmona@ecosur.mx

Dr. Héctor Javier Sánchez-Pérez

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)
Unidad de San Cristóbal de Las Casas
Departamento de Salud
Grupos de Investigación en Salud para América y África Latinas (GRAAL)
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO
Teléfono: +52 (967) 6749 000, ext. 1800
hsanchez@ecosur.mx

Lic. Juan Jesús Morales López

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)
Unidad San Cristóbal de Las Casas
Laboratorios Institucionales
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María Auxiliadora
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO
Teléfono: +52 (967) 6749 000, ext. 1800
jmorales@ecosur.mx

Dr. Arturo Torres Dosal

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)
Unidad de San Cristóbal de Las Casas
Departamento de Salud
Carretera Villahermosa-Reforma km. 15.5
86280 Villahermosa, Tabasco, MÉXICO
Teléfono: +52 (967) 6749 000, ext. 1800
atorres@ecosur.mx

Lic. Sergio Gómez Urbina

El Colegio de la Frontera Sur (Ecosur)
Unidad de San Cristóbal de Las Casas
Laboratorios institucionales
Carretera Panamericana y Periférico Sur s/n, Barrio María
Auxiliadora
29290 San Cristóbal de Las Casas, Chiapas, MÉXICO
Teléfono: +52 (967) 6749 000, ext. 1502
segurbina@cafe-z.org