

**De:** Victor Galvez <[vgalvez@andess.cl](mailto:vgalvez@andess.cl)>

**Enviado el:** jueves, 9 de febrero de 2023 16:32

**Para:** oficina de partes <[oficinadepartessmma@mma.gob.cl](mailto:oficinadepartessmma@mma.gob.cl)>

**CC:** Patricio Herrada B. <[pherrada@andess.cl](mailto:pherrada@andess.cl)>

**Asunto:** RE: Antecedentes concentraciones de nitrógeno en Plantas de tratamiento de aguas servidas

Estimados,

Junto con saludar, complemento el correo anterior con documento adjunto destinado al Sr. Sebastián Jofré, Jefe Departamento de Ecosistemas Acuáticos. Aparentemente había quedado afuera este documento por capacidad del correo.

Saluda atentamente,

—  
Víctor Gálvez O.  
Asesor ANDESS A.G.

☎ T: 56 93079 5726



# EL TRATAMIENTO DEL NITRÓGENO EN LAS PLANTAS DEL GRAN SANTIAGO

## - 1 EL MARCO NORMATIVO: EL DS 90

### ○ 1.1 El “espíritu” de la norma

En el Título II “DEFINICIONES”, el Artículo 5°, la Tabla “Fuente Emisora Valor Característico” atribuye a los parámetros Nitrógeno Kjeldahl y Fósforo los valores respectivamente de  $8 \text{ g.d}^{-1}$  y  $1,6 \text{ g.d}^{-1}$ . Dado que en paralelo establece una dotación de agua potable de  $200 \text{ l.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$  con un coeficiente de recuperación de 0,8, la dotación de aguas servidas es de  $160 \text{ l.hab}^{-1}.\text{d}^{-1}$ , las concentraciones en NTK y P resultantes son respectivamente de  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  y  $10 \text{ mg.l}^{-1}$ .

Por otra parte, al observar estos parámetros en la Tabla 1, que establece los límites máximos permitidos para la descarga de residuos líquidos a cuerpos de agua fluvial, se aprecia que son las mismas concentraciones indicadas en el punto anterior, situación que obedece a la intención normativa (el “espíritu” de la norma) de que no sería necesario incorporar en las plantas de tratamiento de aguas servidas dispositivo para la remoción de dichos parámetros, considerando que los cuerpos de agua fluvial en los cuales descargan estas plantas de tratamiento de aguas servidas no son considerados como sensibles a estos parámetros

### ○ 1.2 La “letra” de la norma

El problema radica en la redacción vigente del DS90 en el límite fijado de NTK y P, que ha quedado con el valor de la norma inicial de  $50 \text{ mg.l}^{-1}$  en Nitrógeno Kjeldahl (la “letra” de la norma), que no corresponde a los valores observados en la realidad. Como se demuestra en el párrafo siguiente, para plantas eficientes de remoción de  $\text{DBO}_5$  y SS, que utilizan, por una parte, en la línea de agua, procesos de decantación primaria y lodos activados de alta carga y, por otra parte, en la línea de lodos, proceso de digestión anaeróbica, la concentración de nitrógeno eliminada, entre flujo de nitrógeno exportado en el lodo digerido y remoción difusa, equivale a  $15 \text{ mg.l}^{-1}$  en el efluente, dejando en  $65 \text{ mg.l}^{-1}$  la concentración máxima admisible en el afluente para ser capaz de cumplir la norma.

## - 2 ETAPA 1 DEL DISEÑO EFICIENTE DE LA EMPRESA MODELO

### o 2.1 Línea de tratamiento de agua

Las plantas de tratamiento de aguas servidas Mapocho-Trebal y La Farfana trata las aguas servidas de una población de más de 7.000.000 habitantes, con un caudal promedio anual de diseño de  $8,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , cada una. Conforme a lo visto en el párrafo anterior, están diseñadas para la remoción de la fracción carbonácea de la contaminación (descrita por los parámetros SS y  $\text{DBO}_5$ ) para cumplir con los requerimientos de la Tabla N°1 del DS 90 en ambos parámetros, utilizando en tratamiento secundario un proceso de lodos activados de alta carga, optimizando los costos de inversión y de operación para el logro del objetivo.

La misma tabla N°1 fija para el parámetro NTK un límite de  $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ .

En la línea agua con decantación primaria y lodos activados de alta carga, la remoción de nitrógeno con el flujo de lodos producidos es de  $15 \text{ a } 20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  y de  $7 \text{ a } 10 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  de remoción difusa entre stripping del amonio en solución y nitrificación en el lodo activado.

### o 2.2 Línea de tratamiento de lodos

La digestión anaeróbica de los lodos “libera” el nitrógeno al hidrolizar la materia orgánica de los lodos, generando altas concentraciones de nitrógeno amoniacal, soluble. El proceso de deshidratación por centrifugación realiza la separación del lodo, con una sequedad del orden de 25% de materia seca, y del agua que retorna a cabecera con las altas concentraciones de nitrógeno, restituyendo así a línea de tratamiento de agua gran parte del nitrógeno removido con el lodo. La cantidad de nitrógeno incorporado al lodo digerido representa un equivalente a  $8 \text{ a } 9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  en la línea agua, mientras que los centrados representan a su vez  $7 \text{ a } 8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  en la línea agua.

### o 2.3 El balance de nitrógeno

Eso significa que el proceso de tratamiento instalado no permite garantizar el cumplimiento del DS90 en nitrógeno, cuando la concentración del afluente supera los  $65 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ :

$$65 \text{ (afluente)} - 8 \text{ (lodos digeridos)} - 7 \text{ (remoción difusa)} = 50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$$

Además, es necesario considerar la precisión de los análisis involucrados para dejar un margen en el límite normativo para que sea real la garantía.

### - 3 EL AUMENTO DE LA CONCENTRACIÓN EN NTK

#### o 3.1 Lo observado de 2005 a 2019

La concentración en NTK del afluente ha sido controlada a lo largo de los años de operación y el gráfico siguiente muestra cual ha sido la evolución de la concentración promedio anual entre 2005 y 2019 en el afluente de La Farfana.

##### ▪ La metodología de medición

La medición está basada en una muestra diaria proporcional al caudal por semana desde el año 2006 hasta el año 2019.

El análisis del parámetro NTK en aguas residuales se realiza según el método exigido en Chile por la norma NCh2313/28:2009. Este método permite la determinación del nitrógeno presente en compuestos orgánicos con grupo amino y del nitrógeno amoniacal, mediante digestión de Kjeldahl, destilación y posterior determinación potenciométrica de amoniaco con electrodo selectivo.

Durante la digestión en presencia de ácido sulfúrico, sulfato de potasio y sulfato de cobre como catalizadores, el nitrógeno amino de varias sustancias orgánicas es convertido a sulfato de amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ : el nitrógeno amoniacal también es convertido a  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . En este proceso, se forma un complejo aminocúprico, el cual es descompuesto por adición de tiosulfato de sodio.

Después de la descomposición, el amoniaco obtenido es destilado desde un medio alcalino y absorbido en una solución de ácido sulfúrico. La muestra destilada es luego llevada a pH básico (>11), de modo de permitir la difusión del amoniaco a través de la membrana del electrodo selectivo; finalmente se determina su concentración potenciométricamente.

El análisis de las muestras incorporó, además del nitrógeno, los otros parámetros orgánicos que son Aceites y Grasas (AyG), Sólidos Suspendidos (SS), Demanda Química en Oxígeno (DQO); Demanda Bioquímica en Oxígeno 5 días (DBO5) y el Fósforo.

##### ▪ Los resultados

Al inicio, la concentración estaba en torno a los 50 mg.l<sup>-1</sup>, conforme en eso a lo que se consideró en la elaboración de la primera versión del DS90, recordada en el párrafo anterior, pero se observa a partir de 2010 un incremento regular, prácticamente lineal, del orden de 2 mg.l<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> de esta concentración, llegando en 2019 al valor de 75 mg.l<sup>-1</sup>.

Evolución NTK Afluente La Farfana

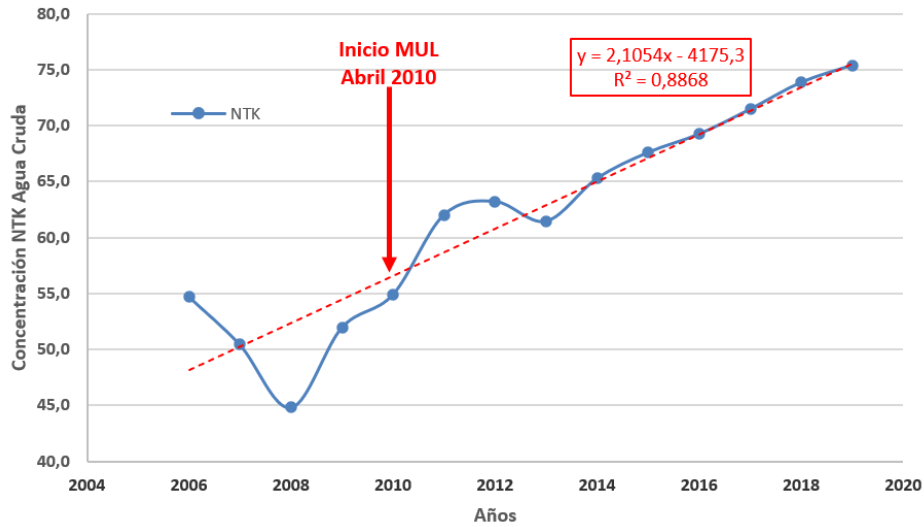


Gráfico N°1: Evolución de la concentración promedio anual en NTK del afluente de La Farfana

La tabla N°1 consolida los valores anuales calculados: Promedios, Máximos, razón Máximo / Promedio y Desviación Estándar.

Año	Número de Muestras	Promedio Anual	Máximo Anual	Razón Max / Prom	Desviación Estándar
	-	mg.l <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	-	mg.l <sup>-1</sup>
2006	51	54,7	80,0	1,46	6,8
2007	52	50,4	64,0	1,27	6,9
2008	53	44,8	58,4	1,30	6,1
2009	52	52,0	73,2	1,41	10,3
2010	52	54,9	71,0	1,29	6,3
2011	39	61,6	88,8	1,44	6,9
2012	51	63,2	88,3	1,40	5,8
2013	52	61,5	87,1	1,42	7,4
2014	52	65,3	91,6	1,40	7,2
2015	52	67,6	100,0	1,48	8,6
2016	52	69,2	96,7	1,40	9,1
2017	51	71,5	88,6	1,24	7,3
2018	52	73,9	99,1	1,34	8,7
2019	29	75,4	97,6	1,29	7,5
<b>Total Serie</b>	690	61,9	100,0	1,62	7,6

Tabla N°1 Resultados de análisis de NTK 2006-2019

La concentración promedio ha pasado de 55 mg.l<sup>-1</sup> en 2006 a 75 mg.l<sup>-1</sup> en 2019, con una razón del máximo sobre el promedio del orden de 1,3 y una desviación estándar entre 7 y 8 mg.l<sup>-1</sup>.

A parte del nitrógeno, el otro parámetro específico de la actividad humana es el fósforo. Este ha presentado una sensible disminución de su concentración a partir del 2010, que puede ser atribuible a la evolución de la industria del detergente que ha fuertemente reducido la dosis de fósforo en la formulación de sus productos.

Los otros parámetros que no son específicos de la actividad humana no han presentado tendencia en la concentración a lo largo de esos 13 años. Los valores son presentados en la Tabla N°2.

Año	AyG	SS	DQO	DBO5	NTK	P <sub>Tot</sub>
	mg.l <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>
2006	65,0	298,4	524,8	254,9	54,7	10,8
2007	54,5	274,3	509,6	226,4	50,4	9,8
2008	52,6	308,6	548,7	234,5	44,8	11,4
2009	52,2	267,8	535,4	245,2	52,0	9,9
2010	65,3	340,3	635,7	277,9	54,9	9,6
2011	52,2	283,0	574,5	237,9	61,6	8,7
2012	50,5	260,5	489,2	283,8	63,2	7,0
2013	65,4	251,7	548,8	252,9	61,5	7,2
2014	55,6	244,2	568,0	234,2	65,3	6,1
2015	55,7	261,0	563,6	266,6	67,6	7,2
2016	58,8	261,9	586,8	271,3	69,2	7,3
2017	60,1	263,3	581,5	254,8	71,5	7,0
2018	66,7	299,2	624,8	268,6	73,9	8,2
2019	74,2	262,9	531,5	242,4	75,4	7,6
<b>Promedio</b>	59,2	276,9	558,8	253,7	61,9	8,4

**Tabla N°2 Resultados de análisis 2006-2019**

En la Tabla N°3 se muestra los valores obtenidos dividiendo la concentración promedio anual en cada parámetro por la concentración promedio de la serie.

AyG	SS	DQO	DBO5	NTK	P <sub>Tot</sub>
-	-	-	-	-	-
1,10	1,08	0,94	1,00	0,88	1,28
0,92	0,99	0,91	0,89	0,82	1,17
0,89	1,11	0,98	0,92	0,72	1,35
0,88	0,97	0,96	0,97	0,84	1,18
1,10	1,23	1,14	1,10	0,89	1,13
0,88	1,02	1,03	0,94	1,00	1,04
0,85	0,94	0,88	1,12	1,02	0,83
1,11	0,91	0,98	1,00	0,99	0,85
0,94	0,88	1,02	0,92	1,06	0,72
0,94	0,94	1,01	1,05	1,09	0,86
0,99	0,95	1,05	1,07	1,12	0,87
1,02	0,95	1,04	1,00	1,16	0,83
1,13	1,08	1,12	1,06	1,19	0,98
1,25	0,95	0,95	0,96	1,22	0,91

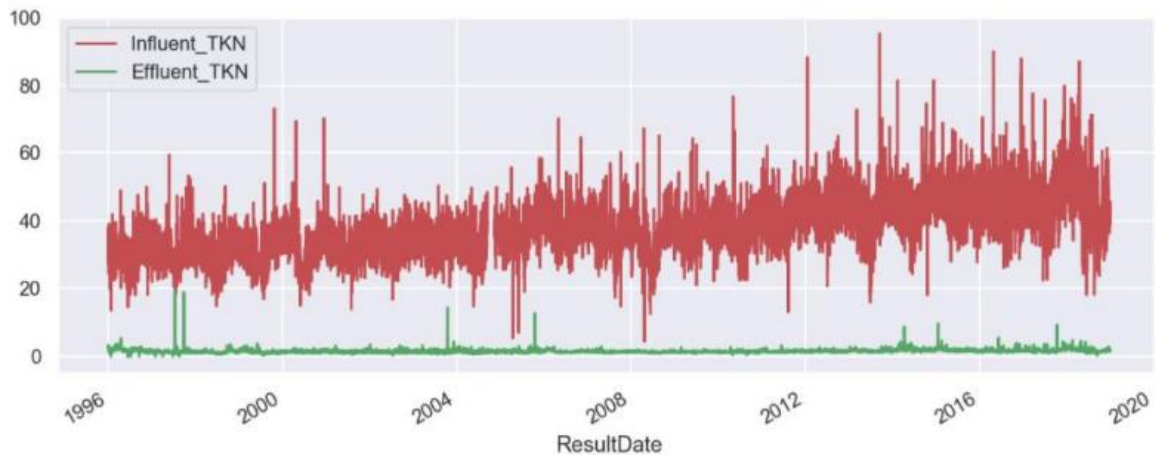
**Tabla N°3 Razón Concentración Anual / Concentración Promedia de la Serie**

Esta tabla muestra claramente como el NTK pasa de 0,88 a 1,22 mientras que el fósforo realiza el camino inverso pasando de 1,28 a 0,91. Sobre los parámetros, se mantienen oscilaciones en torno a 1.

○ **3.2 Un fenómeno general**

Este fenómeno de incremento de las concentraciones en nitrógeno, lejos de ser específico al Gran Santiago, ha sido observado en varias partes de mundo en el cual el tratamiento de aguas servidas tiene más historia, aunque haya sido relativamente poco documentado en la literatura especializada.

Se adjunto a título de ejemplo, el caso de la planta "Nine Springs" de Madison (Wisconsin) en EEUU, operada por el Madison Metropolitan Sewerage District (MMSD). Esta planta presenta una capacidad de tratamiento de  $1,8 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .



**Figure 5.** Relationship between influent and effluent in Total Kjeldahl Nitrogen (TKN).

**Gráfico N°2: Evolución de la concentración anual en NTK del afluente de la PTAS Nine Springs**

Se observa esta misma tendencia, aunque desplazada hacia valores más bajos por los consumos de agua potable por habitante asociados. De 31 mg.l<sup>-1</sup> en 2005 se logra en 2019 un nivel del orden de 42 mg.l<sup>-1</sup> en 2019.

○ **3.3 El aporte de las aguas residuales industriales**

Cabe señalar que, frente al aumento observado, se ha realizado entre 2019 y 2021, varias campañas de control de los vertidos de los Establecimientos Industriales conectados a la red de alcantarillado, incluyendo además el parámetro NTK (lo que no está contemplado por el DS609), de manera a ver si el aporte de aguas residuales permitía explicar la diferencia observada, aunque la regularidad del aumento a lo largo de los años no parezca muy compatible con ese tipo de explicación.

La explotación de los datos está en el archivo adjunto al informe, que contiene para cada subcuenca, Maipo (MAI), Zanjón (ZAN) y Mapocho (MAP), el listado de Establecimientos Industriales (E.I.), con los valores de concentración obtenidos en NTK y NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Tabla N°4). Se considera para determinar el exceso de carga en NTK (que no está en la lista de parámetros del DS 609) el mismo valor que el establecido para el N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de 80 mg.l<sup>-1</sup>.

RUBRO	EMPRESA INDUSTRIAL	Año	Fecha	Caudal			Concentraciones		Flujos		¿Exceso de carga?		Exceso de carga		Caudal Asociado a	
				VDD	NTK	NH <sub>4</sub>	NTK	NH <sub>4</sub>	NH <sub>4</sub>	NTK	NH <sub>4</sub>	NTK	NH <sub>4</sub>	NH <sub>4</sub>	NTK	
				m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	mg.l <sup>-1</sup>	kg.d <sup>-1</sup>	kg.d <sup>-1</sup>	-	-	kg.d <sup>-1</sup>	kg.d <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>		
-	-	-	-													

**Tabla N°4 Datos consolidados de los E.I. par cada subcuenca**

Considerando una tasa de distribución del caudal del MUL (Cuenca MAP) de 55% hacia La Farfana y de 45% hacia MT, se puede entonces estimar cual es el aporte de estos excesos en NTK y M-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> en cada una de las plantas.



El valor obtenido oscila entre los años y las PTAS entre 0,13 y 0,44 mg.l<sup>-1</sup>, lo que constituye una contribución muy menor en la concentración observada en el afluente, como lo muestra la Tabla N°5.

PTAS		LA FARFANA		MAPOCHO-TREBAL		
Caudales PTAS	2019	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	8,613		7,202	
	2020	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	7,964		6,987	
	2021	m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	7,817		7,103	
Tasa Distribución MUL		%	55		45	
Parámetros	Año	Unidad	N-NH4	NTK	N-NH4	NTK
Flujos	2019	kg.d <sup>-1</sup>	85	325	22	125
	2020	kg.d <sup>-1</sup>	33	193	49	143
	2021	kg.d <sup>-1</sup>	30	202	21	82
Caudales	2019	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	1.267	6.161	724	2.596
	2020	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	2.376	5.242	2.017	2.889
	2021	m <sup>3</sup> .d <sup>-1</sup>	875	6.845	718	2.062
Concentraciones en exceso sobre 80 mg.l <sup>-1</sup> promedias	2019	mg.l <sup>-1</sup>	67	53	30	48
	2020	mg.l <sup>-1</sup>	14	37	24	49
	2021	mg.l <sup>-1</sup>	34	30	29	40
Concentraciones promedias de los Riles con exceso	2019	mg.l <sup>-1</sup>	147	133	110	128
	2020	mg.l <sup>-1</sup>	94	117	104	129
	2021	mg.l <sup>-1</sup>	114	110	109	120
Impacto del exceso sobre las concentraciones del afluente	2019	mg.l <sup>-1</sup>	0,11	0,44	0,03	0,20
	2020	mg.l <sup>-1</sup>	0,05	0,28	0,08	0,24
	2021	mg.l <sup>-1</sup>	0,04	0,30	0,03	0,13

**Tabla N°5 Impacto del exceso de carga en NTK y N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> de los E.I. en las concentraciones del afluente de La Farfana y de Mapocho-Trebal**

### ○ 3.4 Las causas identificadas

#### ▪ Disminución del consumo per capita

El primer elemento que pueda explicar una evolución en el tiempo de este tipo es la baja del consumo específico de agua por habitante en litros por habitante y por día (l.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>): considerando que la dotación en producción del contaminante es constante en gramos por habitante y por día (g.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>), la concentración, que es la resultante de la segunda por el primero, va aumentando. En el Gran Santiago, esta disminución de consumo por habitante puede tener dos orígenes, uno en el ahorro del agua y el otro en la proporción creciente de la inmigración con densificación del hábitat.

Esta disminución del consumo per capita ha sido objeto de estudios en varias partes del mundo Europa (Francia, Alemania, ...), Canadá y USA.

El gráfico siguiente muestra el caso del Quebec (Canadá). A pesar de los niveles muy altos de dotación en demanda de aguas potable, la tendencia es la misma con una reducción entre 2011 y 2017 del 15% y un objetivo para 2025 del 26% .

Figure 2 : Évolution de la quantité d'eau distribuée par personne

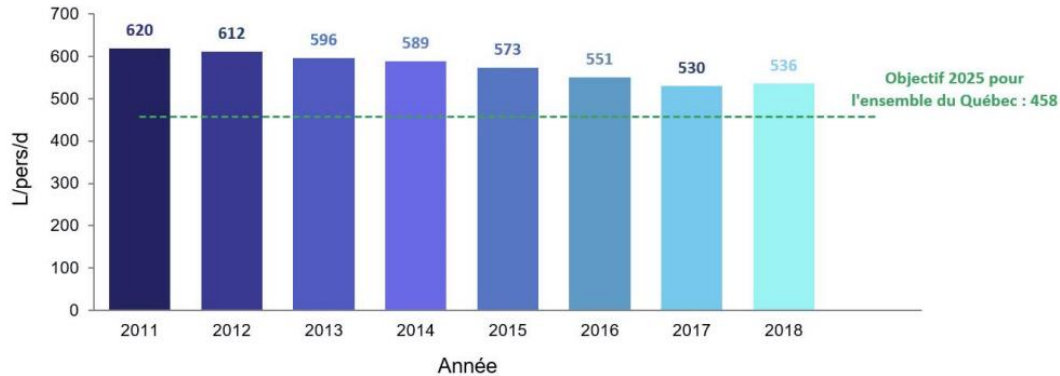


Gráfico N°3: Evolución de la demanda en agua potable per capita en Quebec

- Cambio de la dieta

El segundo elemento que puede explicar la evolución es el cambio de la dieta de las personas que genera una modificación de la dotación por habitante considerada como constante en el párrafo anterior.

Un estudio realizado en Suecia en 2012 muestra como esta dotación ha ido aumentando entre 1992 y 2012 en 5 grandes PTAS además de lo observado en la PTAS de Gothengurg.

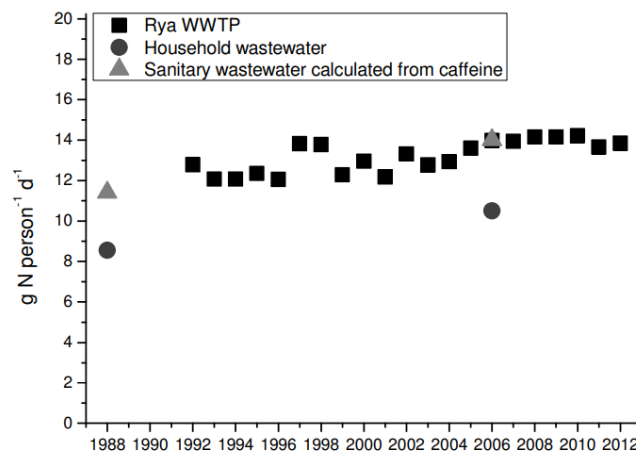


Figure 1. Nitrogen in the influent wastewater at Rya WWTP compared to nitrogen from households and the total load of sanitary wastewater.

Gráfico N°4: Evolución de la dotación en N de la PTAS Rya (Gothenburg)

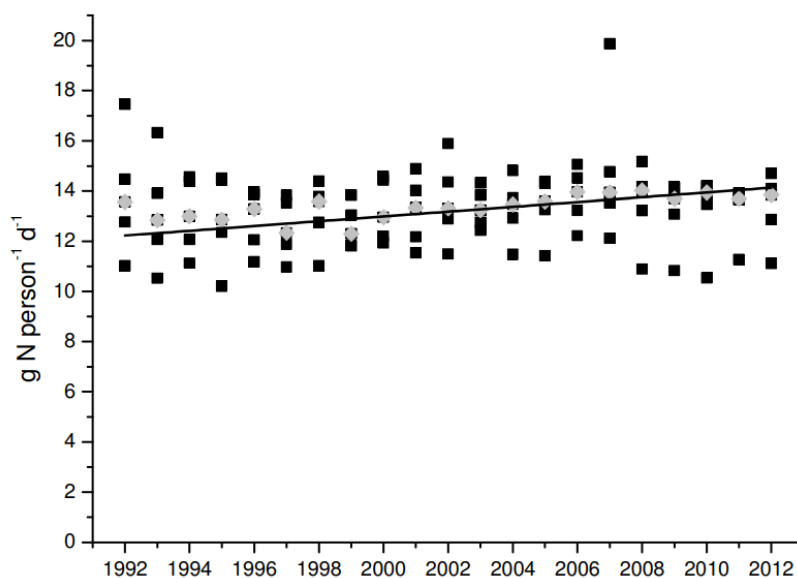


Figure 2. Influent nitrogen load to the five WWTPs. The black squares indicate the values each year for the five WWTPs, the grey diamonds indicate the median value for the five plants. The black line shows the linear fit to the median values.

Gráfico N°5: Evolución de la dotación en N de 5 PTAS en Suecia

El cruce con encuestas realizadas por el Ministerio de Agricultura Sueco (Jordbruksverket) y la Agencia Nacional de Alimentos de Suecia (Livsmedelsverket) ha permitido mostrar que el incremento estaba asociado a un aumento de la cantidad de proteínas en la dieta diaria, como se ve en la tabla siguiente.

Table 1. Differences between the surveys at Jordbruksverket and Livsmedelsverket

	Jordbruksverket – <i>purchased</i> food		Livsmedelsverket- <i>consumed</i> food	
	Protein, g person <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Nitrogen, g person <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Protein, g person <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>	Nitrogen, g person <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup>
1980	87	13.9		
1989	-	-	74.5	11.9
1990	89			
1995	89	14.2		
1998	-	-	81.2	13.0
2000	97	15.5		
2005	102	16.3		
2009	110	17.6		
2010	112	17.9		
2011	110	17.6	80.6	12.9

Tabla N°1: Valores anuales de la cantidad de proteínas en la dieta con el valor de dotación en N asociado

**Anexos:**

- Anexo 1 - Nota acompañamiento archivos
- Anexo 2 – Histórico afluente La Farfana 2005 – 2019
- Anexo 3 – Cargas NTK Riles Cuencas y PTAS 2019 – 2021
- Anexo 4 – Big data analysis from Nine Springs WWTP
- Anexo 5 – InformeUsoAguaPotable\_2018 Québec
- Anexo 6 – Evolution 1992 - 2012 Sweden