

## ANÁLISIS PRELIMINAR DE LA RELACIÓN ENTRE URBANISMO Y RUIDO DE TRÁFICO

PACS: 43.50.Rq

Barrigón Morillas, Juan Miguel<sup>1</sup>; Rey Gozalo, Guillermo<sup>2</sup>; Trujillo Carmona, J<sup>3</sup>; Montes González, David<sup>1</sup>; Atanasio Moraga, Pedro<sup>1</sup>; Vílchez-Gómez, Rosendo<sup>1</sup>; Gómez Escobar, Valentín<sup>1</sup>; Méndez Sierra, Juan A.<sup>1</sup>; Prieto-Gajardo, Carlos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Física Aplicada, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura  
Avda. de la Universidad s/n, Cáceres, 10003, España  
Tel: (+34) 927 25 71 95, Fax: (+34) 927 25 72 03  
E-mail: [barrigon@unex.es](mailto:barrigon@unex.es)

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Chile  
5 Poniente 1670, 3460000 Talca, Región del Maule, Chile;  
E-mail: [greyg@uautonoma.cl](mailto:greyg@uautonoma.cl)

<sup>3</sup> Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de Extremadura  
Avda. Elvas s/n, Badajoz, 06071, España  
E-mail: [trujillo@unex.es](mailto:trujillo@unex.es)

### ABSTRACT

Nowadays, road traffic is the main source of urban noise. Noise maps can be considered as an essential tool to assess the impact of this source and to propose action plans to improve the harmful situations for people. The standard methodology for carrying out noise maps involves the use of a grid to define the evaluation points, either by calculation using propagation models, either by measurements. The ability of the application of urban variables to predict noise levels in any street has been studied in this paper.

### RESUMEN

El tráfico es la fuente de ruido urbano de mayor importancia en la actualidad. Los mapas de ruido pueden considerarse como una herramienta fundamental para evaluar el impacto de esta fuente y proponer planes de acción para mejorar las situaciones perjudiciales para las personas. La metodología normalizada para la realización de mapas de ruido implica el uso de una retícula para definir los puntos de evaluación, sea mediante cálculos, empleando modelos de propagación, bien mediante medidas. En este trabajo estudiamos la capacidad que el empleo de variables urbanísticas tiene para predecir el nivel sonoro que existirá en una calle cualquiera.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento urbanístico que se ha ido produciendo a escala mundial en las últimas décadas ha supuesto un aumento del número y utilización de las infraestructuras de transporte. Esto a su vez ha supuesto un aumento progresivo de los niveles de ruido asociados, en su mayoría, a la fuente de ruido del tráfico rodado [1]. Recientes publicaciones por la Organización Mundial de la Salud indican que la contaminación acústica ocupa el segundo lugar entre los distintos contaminantes ambientales por su impacto sobre la salud pública en ciudades europeas [2].

Un primer paso en la búsqueda de posibles soluciones es el conocimiento de la situación acústica y en este sentido, una herramienta utilizada por diferentes investigadores y recogida en la Directiva Europea de Ruido son los mapas de ruido [3]. Para la realización de los mismos existen diferentes metodologías normalizadas basadas en medidas "in situ" [4] o métodos de cálculo [3]. Sin embargo, la estrategia más utilizada son los métodos de cálculo, que ya están incorporados en diferentes softwares de predicción sonora.

Los métodos de cálculo se basan principalmente en dos tipos de variables: variables asociadas a la fuente sonora (número de vehículos, velocidad media, tipo de vehículos...) y variables asociadas a las características del entorno (altura del terreno, presencia de obstáculos, tipo de pavimentos...).

El tráfico rodado es una variable temporal y espacial, es decir, que va a depender del momento del día y del lugar donde se lleve a cabo la medición. Por lo tanto, para conseguir valores precisos necesitamos realizar mediciones de larga duración y en distintos puntos. Ello conlleva dos posibles inconvenientes: el primero de ellos, es que no disponemos de estaciones continuas de conteo de vehículos en distintos tipos de calles y, el segundo de ellos, que este primer inconveniente, es solucionado con medidas "in situ" cuya duración es medición es limitada y cuyos resultados depende de la estrategia utilizada por el técnico. Estas variables asociadas a la fuente sonora, según diferentes autores [5,6], son las que explican la mayor variabilidad de los niveles sonoros.

Con respecto al entorno urbano, generalmente son variables sólo espaciales, que con el desarrollo de los sistemas de información geográfica, podemos obtenerlas de una manera relativamente fácil en las diferentes administraciones. También, el desarrollo de diferentes visores tridimensionales, por ejemplo los desarrollados por Google, nos pueden aportar gran parte de esta información.

En resumen, las variables urbanísticas son relativamente fáciles de obtener en comparación con las variables asociadas al tráfico rodado y quizás un estudio exhaustivo de las mismas, nos ayude a explicar de manera significativa la variabilidad de los niveles sonoros presentes en las calles y ello nos pueda permitir obtener modelos de cálculo alternativos o utilizarlos conjuntamente con las variables del tráfico rodado para mejorar la precisión de los modelos actuales. Por lo tanto, el principal objetivo de este estudio es el análisis de diferentes variables poblacionales y urbanísticas que nos permitan estimar un porcentaje significativo de la variabilidad de los niveles sonoros.

## METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó en la ciudad de Cáceres, la cual está localizada en la comunidad autónoma de Extremadura, al suroeste de España. La población es de aproximadamente de 95.000 habitantes aunque durante el periodo lectivo de los estudiantes de la Universidad de Extremadura, este número se ve incrementado en unos 10.000 habitantes. También algunas de las variables urbanísticas fueron analizadas en la ciudad de Talca, ciudad localizada en la VII Región de del Chile. La localización de ambas ciudades aparece en la Figura 1.



Figura 1. Localización de las ciudades de Cáceres y Talca

Un total de 135 variables urbanísticas fueron registradas en cada una de las calles donde se registró el nivel sonoro equivalente (periodo diurno de 7:00 – 23:00). Estas variables urbanísticas fueron clasificadas en los siguientes grupos:

1. Ubicación de la calle y demografía: latitud, longitud, población, distancia al centro de la ciudad...
2. Tipo de uso del suelo urbano: áreas industriales, áreas deportivas, áreas de recreo, áreas culturales, áreas educacionales, áreas religiosas, áreas administrativas, áreas sanitarias...
3. Geometría de la calle: longitud, anchura, altura media de los edificios, pendiente, tipo de pavimento...
4. Circulación y conectividad: número de semáforos, pasos de peatones, intersecciones, nodos de comunicación...
5. Transporte público y privado: buses urbanos, taxi, áreas de aparcamiento, gasolineras, puntos de recogida de residuos urbanos...

Una vez registradas las distintas variables urbanísticas, se analizó la relación que presentaban cada una de estas variables urbanísticas (variables independientes) con respecto al nivel sonoro equivalente registrado en el periodo diurno (variable dependiente). Para ello, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman. Se optó por esta prueba no paramétrica pues algunas variables no seguían una distribución normal o tomaban valores discretos.

Una vez realizada esta prueba, aquellas variables que presentaban una correlación significativa con los niveles sonoros, es decir que presentaban un p-valor inferior a 0,05, fueron seleccionadas para llevar a cabo un análisis de regresión múltiple. En este análisis de regresión múltiple se utilizó el Criterio de Información de Akaike (AIC) para seleccionar aquellas variables independientes que contribuyen a mejorar significativamente la explicación de la variabilidad de la variable dependiente [7, 8]. Un elevado número de variables independientes pueden explicar mayor variabilidad de la variable dependiente pero con el inconveniente de construir un modelo complejo. Por esta razón, se utilizó el AIC y así, aplicar el principio de parsimonia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En primer lugar, tal y como se indicó anteriormente, se analizó la significación de la relación de las variables urbanísticas y el Leq(dBA). En la Tabla 1 se muestran aquellas variables urbanísticas que presentaban una correlación significativa (R), es decir, con un p-valor < 0,05.

Tabla 1 – Coeficientes de correlación de Spearman significativos obtenidos del análisis de la relación del Leq(dBA) con las distintas variables urbanísticas. (\*\*\*) p-valor < 0,001; (\*\*) p-valor < 0,01; (\*) p-valor < 0,05.

VARIABLES URBANÍSTICAS	R	VARIABLES URBANÍSTICAS	R
[1] Población	0,30(***)	[4] Conexión con carreteras nacionales	0,39(***)
[2] Áreas deportivas	0,18(*)	[4] Número de semáforos	0,60(***)
[2] Áreas comerciales	0,44(***)	[4] Semáforos por metros	0,59(***)
[2] Áreas administrativas	0,40(***)	[4] Semáforos por kilómetro	0,59(***)
[2] Áreas de ocio	0,38(***)	[4] Paso de peatones	0,32(***)
[2] Áreas culturales	0,24(**)	[4] Nodo de comunicación con estaciones de trenes	0,17(*)
[2] Zonas verdes	0,19(*)	[4] Entradas y salidas de nodos de comunicación	0,17(*)
[2] Áreas educacionales	0,46(***)	[4] Nodos de comunicación con plazas	0,17(*)
[2] Áreas sanitarias	0,26(***)	[4] Nodos de comunicación con estaciones de buses	0,17(*)
[2] Áreas de alojamiento	0,22(**)	[4] Cruces	0,41(***)
[3] Longitud de la calle	0,50(***)	[4] Cambios de sentido	0,23(**)
[3] Anchura de la calle	0,57(***)	[5] Paradas de bus	0,49(***)
[3] Altura de los edificios	0,20(*)	[5] Paradas de bus por kilómetro	0,48(***)
[3] Número de carriles	0,50(***)	[5] Marcas viales de paradas de bus	0,53(***)
[3] Dirección de los carriles	0,53(***)	[5] Paradas de taxi	0,21(**)
[3] Longitud del parking	0,17(*)	[5] Plazas de taxis	0,21(**)
[3] Calles con perfil "U"	-0,23(**)	[5] Tipo de aparcamiento	0,22(**)
[3] Calles con perfil mixto	0,19(*)	[5] Área de aparcamiento	0,23(**)
[3] Buen estado del pavimento	0,32(***)	[5] Plazas de aparcamiento	0,27(***)
[3] Regular estado del pavimento	-0,20(*)	[5] Gasolineras	0,21(*)
[3] Mal estado del pavimento	-0,26(**)	[5] Nº de surtidores en las gasolineras	0,21(*)
[3] Pavimento de asfalto	0,30(***)	[5] Marcas viales de bus	0,17(*)
[3] Pavimento de piedras	-0,20(*)	[5] Puntos verdes	0,25(**)
[3] Pavimento de hormigón	-0,23(**)	[5] Puntos verdes por kilómetro	0,17(*)

En el grupo "ubicación de la calle y demografía", la "población" es la única variable que presentaba una correlación significativa con respecto al Leq (dBA). Esta relación entre ambas variables ha sido estudiada en trabajos previos. Ha sido estudiada bien como densidad o como población total residente [9,10]. Aquellas calles que presentan mayor población residente generan una mayor movilidad de vehículos y con ello, es de suponer que presenten mayores niveles sonoros.

En el grupo "tipo de uso del suelo urbano", las variables "áreas de ocio", "áreas educacionales" y "áreas comerciales" presentan valores de R entre 0,38 y 0,46. Las normas internacionales indican la importancia de la zonificación acústica en la planificación urbana y por ende, este aspecto es recogido en las normativas nacionales, siendo indicados los niveles máximos

permitidos para cada tipo de uso de suelo urbano [3,11]. Los valores sonoros, además de tener en cuenta la sensibilidad de la población expuesta, tienen en cuenta las actividades que van a generar mayores niveles sonoros. Por lo tanto, el tipo de uso del suelo puede estar relacionado con los niveles sonoros presentes. Estas consideraciones han sido tenidas en cuenta por algunos autores. Así el tipo de lugar de ocio puede ser un buen predictor del nivel sonoro [12] y las vías que dan acceso a las zonas de interés (áreas comerciales, educacionales, de salud...) muestran niveles sonoros significativamente diferentes a otros tipos de vías [13, 14]

En el grupo de variables “Geometría de la calle” principalmente destacan las variables “longitud de la calle” y “anchura de la calle”. La importancia de estas variables urbanísticas también ha sido identificada por otros autores [12, 15] en la mejora de la relación entre las variables asociadas a la fuente de tráfico rodado y el nivel sonoro equivalente. En estos estudios [15], el porcentaje de variabilidad explicada por las variables urbanísticas es muy bajo comparado con las variables asociadas a la fuente del tráfico rodado. Otras variables que presentan coeficientes de correlación elevados son las variables “número de carriles” y “dirección de los carriles”, las cuales presentan un R superior a 0,50. Estas variables presentan una relación significativa con respecto a la “anchura de la calle”.

En el grupo de variables “circulación y conectividad” aparecen variables que no habían sido mencionadas en trabajos anteriores y que se relacionan muy significativamente con el  $L_{eq}$  (dBA). Entre ellas destaca el valor de R de las variables relacionadas con los “semáforos”. Son las variables con mayor R. También destacar otras variables como “conexión con vías nacionales” y “cruces”. La frecuencia de algunos de los dispositivos o marcas presentes en las vías urbanas para regular el tráfico están relacionados con la funcionalidad de las vías de comunicación y que en diferentes estudios han mostrado su relación significativa con los niveles sonoros [9, 13, 14].

Por último, el grupo de variables “Transporte público y privado”, destacan las variables relacionadas con los autobuses urbanos. En algunas ciudades, el transporte público constituye una importante fuente de ruido [16]. Esto ocurre en las ciudades de Chile y en la Figura 2 se muestran resultados previos de un estudio que se está realizando en la ciudad de Talca (Chile).

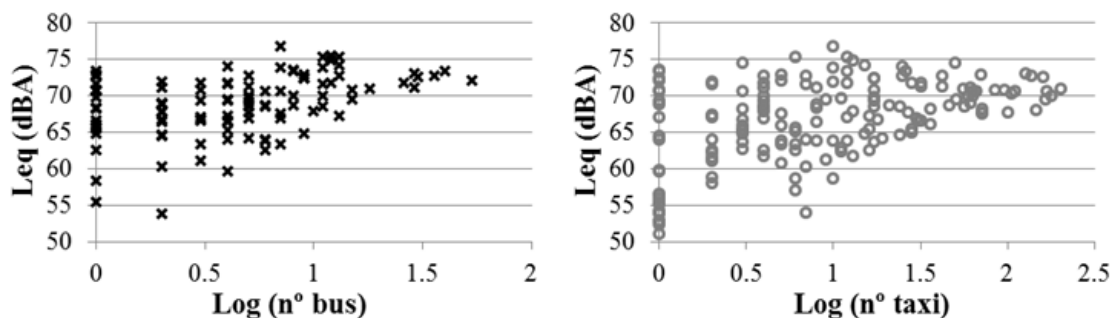


Figura 2 – Relación entre las variables  $L_{eq}$ (dBA) y el  $\text{Log}(n^{\circ}$  buses urbanos) –  $\text{Log}(n^{\circ}$  taxi)

Los coeficientes de correlación (R) fueron de 0,40(\*\*\*) para los autobuses urbanos y de 0,48(\*\*\*) para los taxis. En nuestro estudio no se analizó el flujo de taxi and autobuses urbanos sino características urbanísticas relacionadas con estos transportes.

A continuación. Se realizó a cabo un análisis de regresión múltiple con todas las variables que se muestran en la Tabla 1. Los resultados de este modelo fueron:

- $R^2$  múltiple: 0,65
- $R^2$  ajustado: 0,52
- p-valor < 0,001
- AIC: 977,8

Efectivamente el  $R^2$  múltiple es elevado pero el AIC también. Por ello, como se indicó en la sección anterior, las variables fueron incluidas paso a paso en el modelo de regresión múltiple. Con este tipo de análisis se obtuvieron dos modelos de regresión:

- Modelo 1:  $Leq \sim$  anchura de la calle + semáforos + buena condición del pavimento + áreas de ocio + marcas viales de parada de bus + áreas comerciales
- Modelo 2:  $Leq \sim$  longitud de la calle + anchura de la calle + semáforos por metro + áreas de aparcamiento + buena condición del pavimento + áreas de aparcamiento + áreas de ocio

Ambos modelos presentan un mayor  $R^2$  ajustado (coeficiente de determinación que tiene en cuenta el número de variables en el modelo) y un menor valor de AIC que el modelo de regresión que recoge todas las variables urbanísticas. Ambos modelos de regresión obtenidos presentan variables urbanas en común: anchura de la vía, semáforos, buena condición del pavimento y áreas de ocio. Anteriormente ya indicábamos que estas variables habían sido incluidas en modelos de regresión estimados por otros autores [12,15]. También estudios preliminares realizados en la ciudad de Talca (Chile) muestran cómo la variable urbanística “anchura de la vía” se relaciona significativamente con el  $Leq$  ( $R = 0,46^{***}$ ).

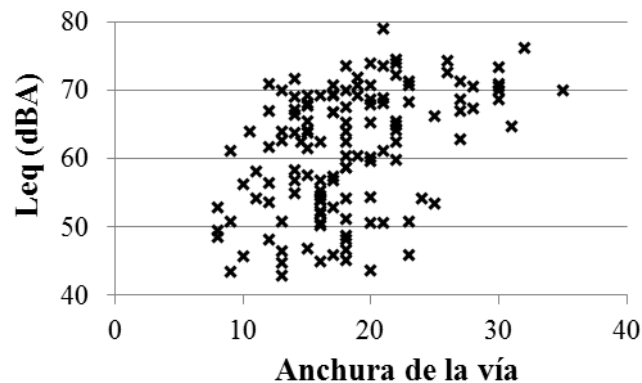


Figura 3 – Relación entre  $Leq(dBA)$  y la anchura de la vía

Sin embargo, ambos modelos de regresión presentan variables urbanísticas diferentes. Por ello, se analizó la varianza residual de ambos modelos (Tabla 2).

Tabla 2 – ANOVA del Modelo 1 y Modelo 2

Modelo	Varianza residual	F test	P-valor
1	3884,4		
2	3627,7	10,3	0,002

En la Tabla 2 se muestra cómo el Modelo 2 presenta una varianza residual menor que el Modelo 1. Además la diferencia entre varianzas es estadísticamente significativa ( $p$ -valor  $< 0,01^{**}$ ). Por lo tanto, fue seleccionado el Modelo 2:

$$L_{eq} = 47,9 + 7,97E-03 \text{ longitud de la calle} + 2,67E-01 \text{ anchura de la calle} + 363,6 \text{ semáforos por metro} + 1,92E-03 \text{ áreas de aparcamiento} + 2,89 \text{ buena condición del pavimento} - 1,62E-02 \text{ plazas de aparcamiento} + 5,73E-03 \text{ áreas de ocio}$$

A continuación, el modelo de regresión lineal múltiple fue validado a través de pruebas de normalidad (test de Shapiro-Wilk), homocedasticidad (test de Breusch-Pagan) y linealidad (test RESET). Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3 – Pruebas para la validación del modelo de regresión lineal múltiple

Prueba	P-valor
Shapiro-Wilk	0,22
Breusch-Pagan	0,05
RESET	0,14

En resumen, este trabajo previo nos muestran un modelo construido con un conjunto de variables urbanísticas que puede predecir muy significativamente el 57% de la variabilidad del Leq (dBA). Modelos construidos a partir de variables urbanísticas pueden ser muy importantes en la planificación urbana cuando no se disponen datos de flujo y composición de tráfico y de velocidad estimada.

## CONCLUSIONES

En este estudio previo realizado en la ciudad de Cáceres nos muestra como variables urbanísticas relacionadas con la “ubicación de la calle y demografía”, “tipo de uso del suelo”, “geometría de la calle” y “circulación y conectividad” presentan relaciones significativas con los niveles sonoros. Se tratan de variables que son fácilmente cuantificables y que cualquier entidad o persona no cualificada puede registrar.

Un total de 135 variables urbanísticas fueron registradas en distintas calles de Cáceres y de ellas, 48 presentaban correlaciones significativas con respecto al Leq (dBA). Un análisis de regresión múltiple fue llevado a cabo sobre estas 48 variables. El modelo seleccionado predice significativamente el 57% de la variabilidad del Leq (dBA). Este modelo incluye las variables urbanísticas: longitud de la calle, anchura de la calle, semáforos por metro, áreas de aparcamiento, buena condición del pavimento, plazas de aparcamiento y zonas de ocio. La importancia de algunas de estas variables no había sido detectada en modelos de predicción anteriores.

Los resultados de este estudio preliminar pueden ser importantes en modelos de planificación urbana bien como alternativa a los modelos que incluyen variables como el flujo del tráfico, composición del tráfico y velocidad de la vía (pues puede ser que no se disponga de esta información de forma precisa) o como complemento a los mismos.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Consejería de Empleo, Empresa e Innovación - Gobierno de Extremadura (GR10175), Fondo Social Europeo, Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) y el Ministerio de Economía y Competitividad (TRA2012-37117) por la financiación del proyecto. También este trabajo ha sido parcialmente financiado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICYT) a través del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) para investigadores de iniciación (Nº 11140043)

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] EEA (European Environment Agency). Transport at a crossroads TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union. EEA Report 3, 2009.
- [2] WHO (World Health Organization), Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe, WHO, Geneva, 2011.
- [3] COM. Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise (END). Official Journal L, 189. Brussels: The European Parliament and the Council of the European Union; 12–26, 2002.
- [4] ISO 1996-2. Description, measurement and assessment of environmental noise. Part 2: Determination of environmental noise levels. Geneva: International Organization for Standardization; 2007.
- [5] Steele C. A critical review of some traffic noise prediction models. *Appl. Acoust.*, 62, 2001.
- [6] Garg N and Maji S. A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications. *Environ. Impact Assess. Rev.*, 46, 2014.
- [7] Bozdogan, H. Model selection and akaike's information criterion (aic): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*, 52(3), 1987.
- [8] Burnham KP, Anderson DR. *Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach* (2nd ed.), Springer-Verlag, 2002.
- [9] Barrigón Morillas JM, Gómez Escobar V, Rey Gozalo G, Vílchez-Gómez R. Possible relation of noise levels in streets to the population of the municipalities in which they are located. *J. Acoust. Soc. Am.*, 128 (2), 2010.
- [10] Salomons EM, Pont MB. Urban traffic noise and the relation to urban density, form, and traffic elasticity. *Landscape Urban Plan.*, 108, 2012.
- [11] Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, *Boletín Oficial del Estado*, España, 254, 2007.
- [12] Ballesteros MJ, Fernández MD, Flindell I, Torija AJ, Ballesteros JA. Estimating leisure noise in Spanish cities. *Appl. Acoust.*, 86, 2015.
- [13] Rey Gozalo G, Barrigón Morillas JM, Prieto Gajardo C. Urban noise functional stratification for estimating average annual sound level. *J. Acoust. Soc. of Am.*, 137 (6), 2015.
- [14] Rey Gozalo G, Barrigón Morillas J M, Gómez Escobar V, Vílchez-Gómez R, Méndez Sierra JA, Carmona del Río FJ, Prieto Gajardo C. Study of the categorisation method using long-term measurements. *Archives of Acoustics*, 38(3), 397-405, 2013.
- [15] Torija AJ, Genaro N, Ruiz DP, Ramos-Ridao A, Zamorano M, Requena I. Priorization of acoustic variables: Environmental decision support for the physical characterization of urban sound environments. *Build. Environ.*, 45, 2010.
- [16] Paunović K, Belojević G, Jakovljević B. Noise annoyance is related to the presence of urban public transport. *Sci. Total Environ.*, 481, 2014.