Revista de Investigaciones en Técnica Vocal
Vol. 3, Nro. 2 (2015), 37-52
ISSN: 2347-0275, e-ISSN: 2451-6082
www.gitev.com.ar/revista - info@gitev.com.ar
Recibido: 20 de Septiembre de 2015
Aceptado: 16 de Diciembre de 2015

ESPECTROGRAFÍA DE LOS REGISTROS VOCALES EN LA VOZ CANTADA

Rodrigo Maximiliano Jerez
Universidad del Museo Social Argentino
Grupo de Investigaciones en Técnica Vocal (LEEM, FBA- UNLP)
rodrigomjerez@yahoo.com.ar

Resumen

Introducción: El análisis acústico y espectrográfico de la señal audible es útil para conocer la actividad fonatoria. Más aún, en el caso de la voz cantada, este instrumento permite diferenciar los diversos mecanismos de producción al servicio del canto - **Objetivo**: Exponer los elementos acústicos que hacen posible la distinción entre un registro y otro estableciendo relaciones con la fisiología laríngea - **Material y método**: se tomaron muestras de voz cantada en 10 sujetos masculinos y 10 sujetos femeninos para todos los registros, excepto para el registro de silbido, extraído de una canción grabada previamente - **Resultados**: Los elementos de análisis elegidos muestran diferencias claras entre un registro y otro - **Conclusiones**: La información visual-acústica aporta datos sobre el estadio del generador y su relación con el tracto vocal, además de las condiciones físicas precedentes necesarias para producir voz.

Palabras claves

Espectrografía - Registros Vocales - Voz Cantada - Análisis Acústico

SPECTROGRAPHY OF THE VOCAL RANGES IN SINGING VOICE

Abstract

Introduction: The acoustic and spectrographic analysis of the audible signal is useful to recognise the fonatory activity. Even, in the case of the singing voice, this instrument alouds to differentiate the various mechanisms of production in favor of singing. - **Objective:** Explain the acoustic elements that enable the distinction between a vocal range and another, establishing relations with laryngeal physiology. - **Material and method:** We took some samples of singing voice in ten male subjects and ten female subjects for all vocal ranges, except whistle register, taken from a previously recorded song. - **Results**: Scanning selected items show clear differences between a vocal range and another. - **Conclusions**: Acoustic-visual information provides

data about the state of the generator, and its relation with the vocal tract, in addition to the physical conditions precedent required to produce voice.

Key-words
Spectrography - Vocal Ranges - Singing Voice - Acoustic Analysis

.....

Introducción

El arte del canto reconoce diversos principios mecánicos para la realización del sonido vocal. En primera instancia dichos mecanismos se identificaron y diferenciaron de manera auditiva prestando atención a la característica tímbrica resultante y a las sensaciones vibratorias. Luego con el estudio de la anatomía y fisiología laríngeas, sumado al desarrollo de los métodos de exploración -especialmente, los estudios por imágenes- fue posible corresponder la información auditiva con un tipo de pesquisa visual-fisiológica.

Hoy además de reconocer e individualizar los modos de producción de la manera antes mencionada, es posible sumar una discriminación visual-acústica. Para ello, naturalmente, es imprescindible conocer los elementos e indicios físico-acústicos capaces de aportar información en relación a la producción vocal.

Es el objetivo del presente trabajo exponer de manera concreta aquellos elementos que hacen posible la distinción o diferenciación de los registros vocales en la voz cantada por medio del análisis acústico de la voz y relacionar estos fenómenos con el comportamiento físico y fisiológico que permite la aparición del sonido vocal.

Registros vocales en el canto

Desde el principio y por mucho tiempo, el concepto de registro no fue asociado al de producción vocal sino al del fenómeno físico de la resonancia; de ahí los nombres que aún perduran, como registro «*de cabeza*» o «*de pecho*». Sin embargo, se sabe que no es así.

Por un lado, la resonancia y sensaciones vibratorias a nivel del tracto y resto del cuerpo deben su percepción a la frecuencia originada en la fuente; por otro, es la fuente misma quien discrimina las formas de producción desde el momento de su origen dado a nivel subglótico por la propulsión del aire.

Tanto de un mecanismo de producción vocal como de otro, se es capaz de generar una serie de sonidos estables y homogéneos; el principio mecánico y

la serie de consecuencias sonoras que éste produzca es lo que en el presente trabajo denominaremos «*registro*» (García, 1840).

A lo largo de la bibliografía se establece la existencia de diversos modos de producción, más en el presente trabajo se considerarán: registro de pulso -vocal fry o frito vocal-, registro modal -de pecho o chest-, registro de falsete, registro elevado -de cabeza- y registro de silbido -también llamado flauta-.

A nivel fisiológico, además del comportamiento aerodinámico, se reconoce la preponderancia y relación de dos músculos: tiroaritenoideo o músculo vocal (TA) y cricotiroideo (CT). Las relaciones directas entre ellos y las estructuras que involucran serán descriptas al presentar los resultados y establecer la discusión.

Material y método

La población estuvo compuesta por 20 sujetos, 10 de sexo masculino y 10 de sexo femenino de entre 20 y 30 años. Dentro de la población había cantantes líricos -de música académica o docta- y cantantes populares.

Tarea fonatorias solicitadas:

- En los cantantes líricos se solicitaron muestras para los registros elevado -en mujeres- y modal -en varones-,
- En cantantes populares para los registros de pulso -fry o frito-, modal y falsete -ambos sexos-.
- A toda la población se le pidió muestra de glissando partiendo de registro de pulso.

Todas las emisiones fueron realizadas con las vocales /a/ y /e/.

La muestra del registro de flauta o silbido es un fragmento extraído de una canción previamente grabada.

Cada una de las muestras fue sometida a un proceso de análisis espectrográfico con el programa PRAAT y posteriormente se realizó una descripción detallada de los contornos de frecuencia, intensidad, armónicos y formantes.

Resultados y discusión

Los resultados y la discusión serán presentados de manera simultánea para facilitar el intercambio teórico entre ambos. Los gráficos elegidos son repre-

sentativos del total de muestras tomadas para cada registro y del comportamiento general observado en cada una.

Frecuencia

El registro de pulso no permite reconstruir un contorno de frecuencia definido *(ver figura 1c)*. La tonicidad muscular de los pliegues vocales no permite completar de la manera más efectiva los lentos ciclos ondulatorios, no hay un recorrido parejo de la onda mucosa y los períodos de apertura y cierre no son regulares ni se suceden armónicamente. Incluso en otras muestras, aparecieron curvas errantes o líneas interrumpidas. Acústicamente este registro evidencia una señal anárquica similar al ruido.

El registro modal, por su parte, no solo se presenta gráfica sino también auditivamente distinto al anterior *(ver figura 1c)*. Es posible completar una curva de frecuencia con la información proporcionada por la fuente. La constancia y periodicidad del oscilador -pliegues vocales- generan ciclos idénticos por segundo, capaces de ser codificados en un contorno claro y estable. Los sonidos, bajo este mecanismo, serán más agudos o más graves dependiendo de la velocidad de la ondulación mucosa, y ésta a su vez, estará a merced de la velocidad del aire espirado y del estado de los cuerpos elásticos que colisionen y generen la perturbación.

Ambos elementos -aire espirado y condición de los cuerpos elásticos- son interdependientes y actúan dentro de un marco fisiológico que no permite exceder los límites esperables -por lo menos no sin alteraciones en la eficiencia del mecanismo-.

Haciendo uso de este registro, hacia los sonidos agudos *(ver figura 2)*, la curva se vuelve inestable y tiende a presentar quiebres o temblores. Se entiende que a altas frecuencias, la estructura interna de los pliegues es más compacta observándose mayor rigidez. Puede o no haber un cambio directo en la cantidad de masa participante -lo que generará una modificación en el plano longitudinal-,o cambios en la posición vertical laríngea, pero no siempre se cumple de la misma manera.

La cantidad de masa interviniente durante el registro modal puede ser variada por la acción del músculo TA, el cual al contraerse aumentará su tensión y disminuirá su tamaño transversal.

En el caso del registro de falsete *(ver figura 4)* y elevado (*ver figura 3c*) las curvas en extensión, suelen ser similares ya que las frecuencias que se alcan-

zan son muy cercanas. Lo que la diferencia es la estabilidad. Los contornos de falsete en personas no entrenadas en este mecanismo suelen ser más irregulares y disparejos que aquellos que describe el registro elevado.

A nivel fisiológico, en ambas situaciones, lo decisivo es el cambio longitudinal que sufren los pliegues vocales consecuencia de la acción del músculo CT. La elongación podrá estar más o menos acompañada de tonicidad muscular proporcionada por el TA, lo que permitirá la diferenciación entre uno y otro registro a nivel de intensidad y armónicos.

Puede haber cortes en la curva, durante la zona de transición entre registros *(ver figuras 2 y 4)*, lo que por lo general, es señal de un bajo dominio en el relevo de falsete a elevado.

El registro de silbido *(ver figura 5)* constituye una situación extraordinaria en cuanto a posibilidades vocales. La curva de frecuencia no presenta diferencias con respecto a los otros sonidos tonales, aunque naturalmente haya una reconfiguración amplia en el mecanismo de producción. Se reconoce, a nivel fisiológico, un aumento de tensión en los extremos anterior y posterior de los pliegues vocales, lo que disminuiría la superficie ondulatoria interactuante en la generación de la voz.

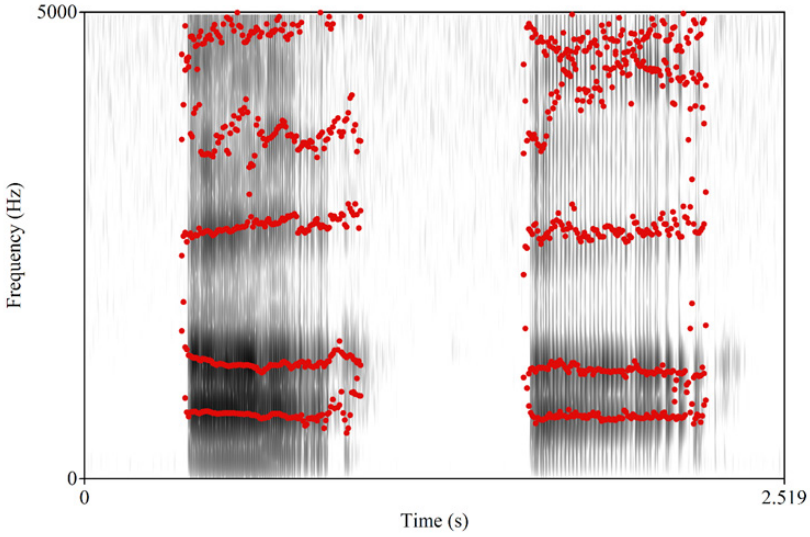

Figura 1a. Registro modal y de pulso: espectrograma de banda ancha con contorno de formantes.

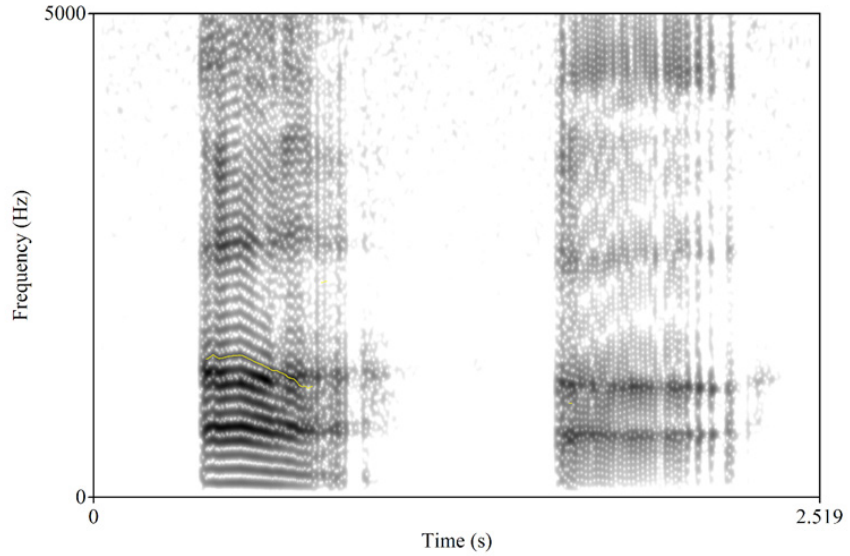

Figura 1b. Registro modal y de pulso: espectrograma de banda estrecha.

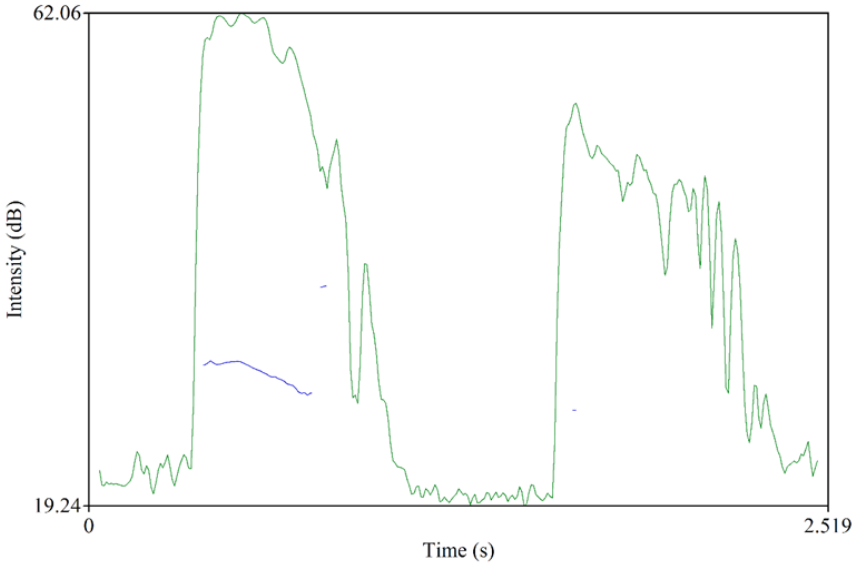

Figura 1c. Registro modal y de pulso: contorno de intensidad (verde) y frecuencia (azul).

Intensidad

La curva de intensidad en el registro de pulso permanece inestable y disminuida en unidades absolutas de medida en relación a la del registro modal (*ver figura 1c*). Desde el punto de vista acústico, al no remitir a un sonido tonal, se comporta como ruido y la naturaleza desordenada de la oscilación es la que aporta dicha inestabilidad sobre todo hacia el final de la emisión. Desde el punto de vista fisiológico, la onda mucosa no presenta ciclos regulares. Existe una máxima contracción transversal a la dirección de los pliegues vocales (TA fascículo externo), lo que completa el cierre glótico, aun así el cuerpo de las cuerdas vocales está bastante laxo como para estabilizar el soplo constante que aporta la energía necesaria para producir voz.

En el registro modal, la curva guarda una relación de estabilidad consonante a la de la frecuencia *(ver figuras 1c y 2)*. Los pliegues remiten a una dinámica mecánica distinta y la misma característica tonal, posiblemente posibilite la potenciación de la energía resultante. Los ciclos se completan con regularidad, aumentando la cantidad de masa que participa en la fonación. A mayor masa, mayor resistencia a vencer, mayor energía aportada por el sistema respiratorio, mayor energía aérea transducida en sonido.

La curva de intensidad en el registro modal y elevado (*ver figura 3c*) no difiere mucho en cuanto a forma y si comparamos los valores absolutos entre uno y otro, puede que guarden idéntica relación. Si bien la velocidad del aire cambia de un sonido grave a uno agudo, la intensidad no parece verse fuertemente afectada. Es posible que la interacción entre tensiones musculares permita el intercambio de mecanismos con un resultado similar. La cantidad de masa en el registro modal es compensada por la tensión longitudinal de los pliegues y la laxitud es compensada por la disminución de la masa vibratoria. Además un cambio en la velocidad del aire no necesariamente implica un aumento en el intercambio o cantidad por unidad de área.

Para los sonidos agudos en registro modal la curva de intensidad aumenta simultáneamente con la frecuencia. Al alcanzar sonidos que no le son del todo propios, el cuerpo de la cuerda se rigidiza en buena proporción -músculo TA-, aumentado la fuerza de colisión a raíz del aumento de resistencia y presión de aire espirado. En cambio, para los sonidos que les son propios al registro elevado, la interacción es otra ya que el mecanismo de elongación -músculo CT- facilita el cambio y la aducción se distribuye a lo largo de todo el sistema.

Por otro lado, en el registro de falsete la curva desciende *(ver figura 4)*, evidenciando pérdida de energía acústica. Se reconoce que durante la producción de este registro existe una hendidura posterior observable en los estudios por imágenes, que puede obedecer a la falta de rigidez en los pliegues vocales y/o a una disminución de la compresión medial a nivel de los procesos vocales.

En la zona de transición de registro pulso a modal *(ver figuras 2 y 4)*, la curva reorganiza su distribución y se torna más estable. De modal a falsete *(ver figura 4)* presenta un descenso brusco para luego volver a escalar en simultáneo con la curva de frecuencia.

El registro de silbido *(ver figura 5)* tampoco sufre cambios a nivel de valores absolutos. En comparación, tanto el registro modal como el de silbido presentan un contorno de similar distribución. Cambia la configuración glótica pero no hay modificación a nivel de propulsión aérea ni de presión. Y si bien se observa cierta irregularidad, los cambios no son perceptibles ni es posible asociarlo a temblor.

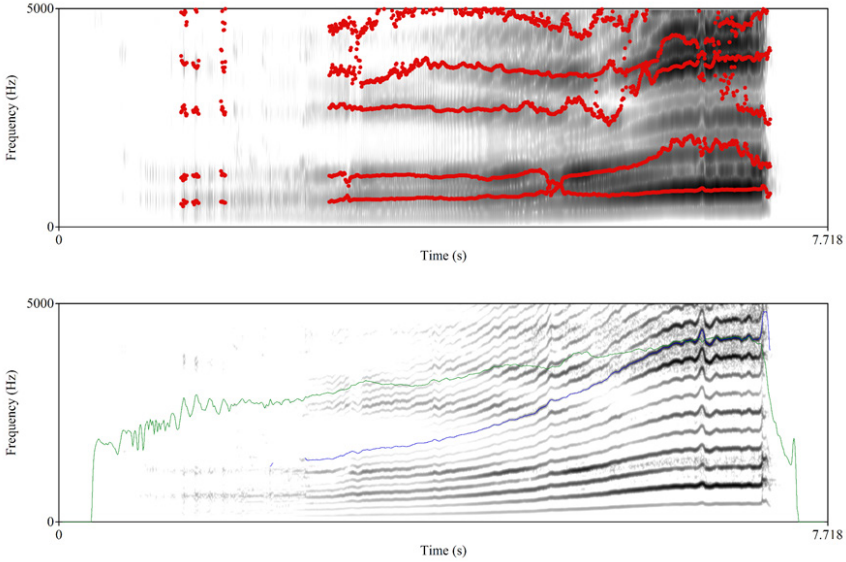

Figura 2. Glissando frito – modal. (De arriba abajo) Espectrograma de banda ancha y contorno de formantes, y espectrograma de banda estrecha, contorno de frecuencia e intensidad.

Armónicos

Durante la emisión en registro de pulso no se observan armónicos definidos *(ver figura 1b)*. Al no haber una frecuencia precisa no es posible organizar el espectro según un patrón determinado. El ruido, en el ejemplo, se concentra en las frecuencias bajas pero no define sobretonos con claridad.

En cambio, en el resto de los registros observados *(ver figuras 1b, 3d y 5)*, los armónicos acompañan la frecuencia fundamental y el valor de cada uno es posible de ser conocido aplicando a una u otra señal el teorema y/o transformada de Fourier.

La estabilidad de estos sobretonos es variable según el lugar del espectro en el que se encuentren. Todos ellos se general a nivel de la fuente, pero a medida que alcanzan zonas más alejadas de su origen y se adentran en el tracto vocal, éste las afecta y los pequeños e imperceptibles cambios de formas se ven reflejados en contornos temblorosos que ni siquiera llegamos a discriminar.

Como característica particular, en el registro modal, se observa mayor concentración de energía en el segundo armónico; en cambio en el registro elevado, la energía se aglutina en el primero. Si no hay una reconfiguración mecánica, y el registro modal se mantiene hacia las frecuencias agudas, la energía permanece concentrada en el segundo armónico *(ver figura 2)*.

El espectro en el registro de falsete, en las frecuencias que le son propias, se comporta de manera idéntica que el registro modal. El segundo armónico sobresale en el espectro pero ciertamente los valores absolutos son menos en términos generales a los del registro en comparación. La misma disipación de energía generada por una posible abertura es lo que resta definición y marca una diferencia también a nivel de la intensidad.

En la zona de transición de modal a falsete la energía de los armónicos se redistribuye, lo que también tendrá impacto sobre la interacción armónico-formante.

En el registro de silbido (*ver figura 5*), al igual que los anteriores, también presenta un espectro definido pero mucho más circunscripto. La fundamental es tan alta que la distribución misma de los armónicos es discreta dentro de los cuadros de análisis.

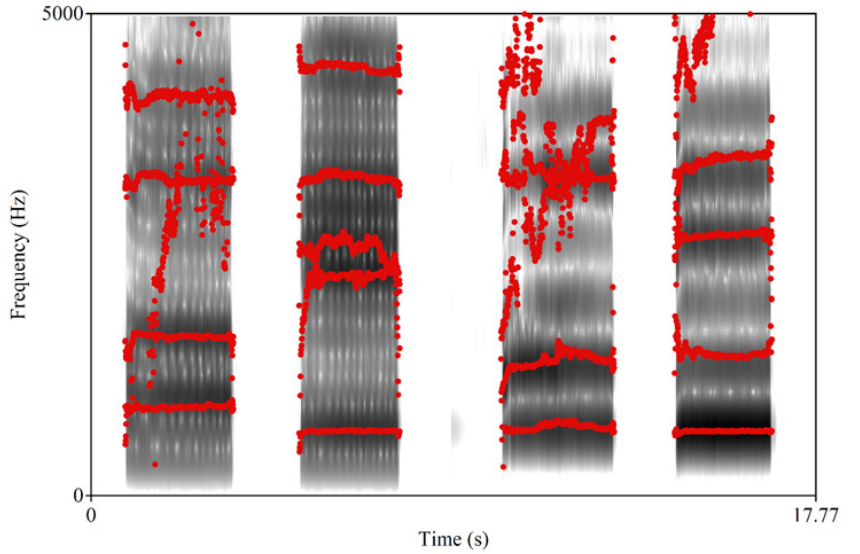

Figura 3a. Registro modal y elevado: espectrograma de banda ancha y contorno de formantes.

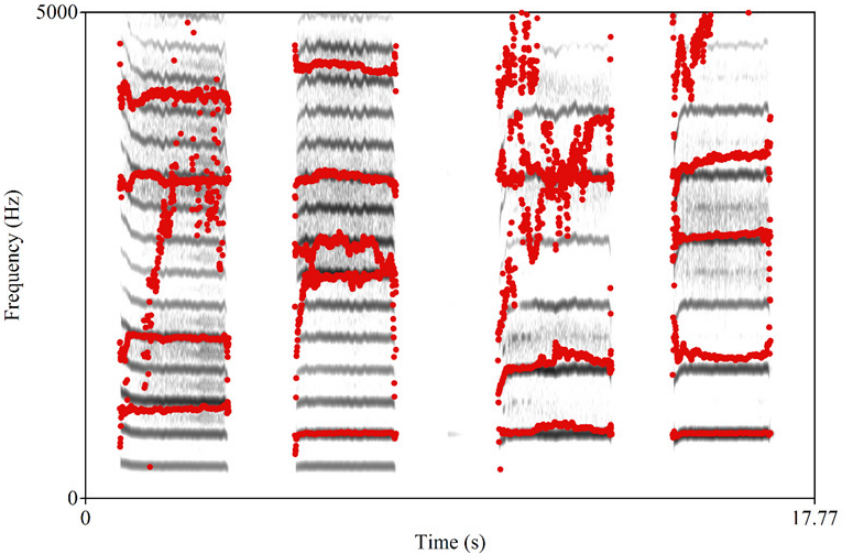

Figura 3b. Registro modal y elevado: espectrograma de banda estrecha y contorno de formantes.

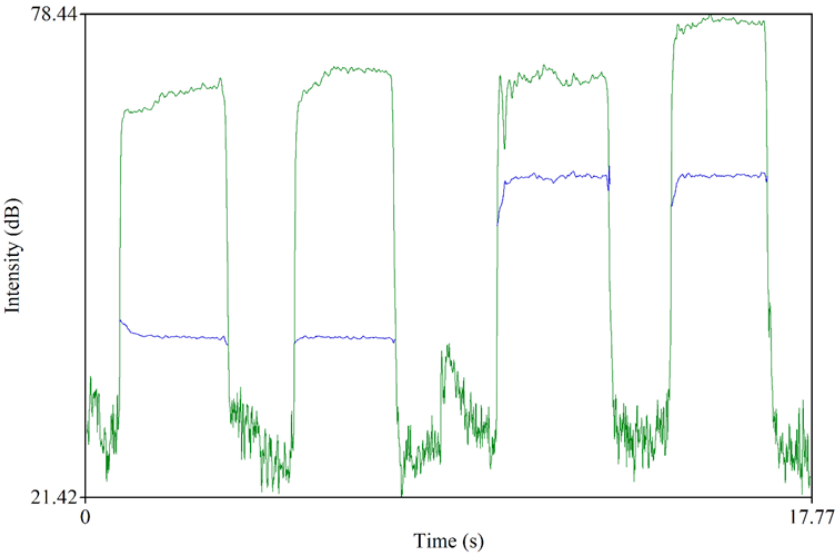

Figura 3c. Registro modal y elevado: contorno de frecuencia e intensidad.

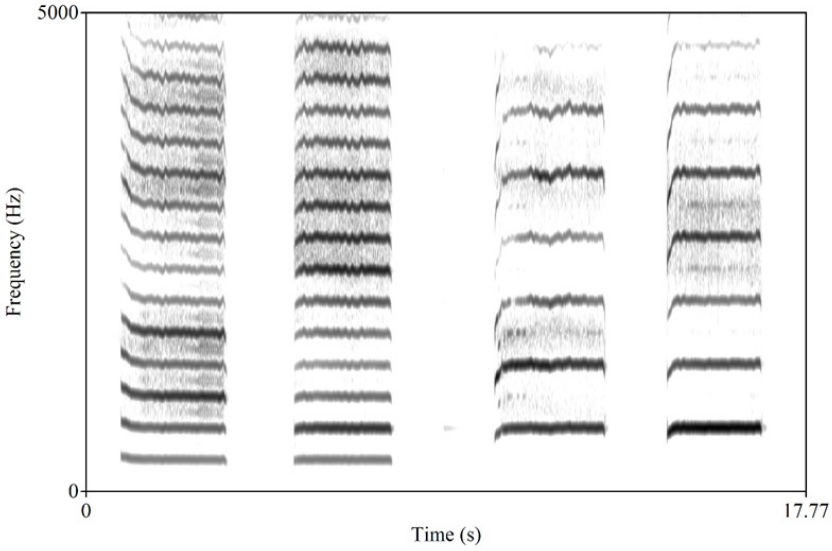

Figura 3d. Registro modal y elevado: espectrograma de banda estrecha.

Formantes

Los formantes aparecen en todos y cada uno de los registros en mayor o menor número. Esto nos permite disociar su presencia del estado, funcionamiento o compromiso de la fuente, y vincularlos de modo directo a la situación del tracto vocal ante un estímulo mecánico o sonoro.

En el registro de pulso (*ver figura 1a*) las curvas representativas sonconstantes aunque inestables, debido a que el estímulo-origen acústicamente es más parecido a un ruido. Se definen hasta tres formantes, y por encima de éste la señal se dispersa.

El registro modal (*ver figura 3b*) presenta en sus formantes mayor estabilidad y número ya que la señal primera es regular y periódica. A diferencia del caso anterior, aquí los formantes tienen la posibilidad de sintonizar con el espectro armónico subyacente propio de la fuente. En este registro, el primer formante se posiciona a la altura de los armónicos H2 y H3, y el segundo formante entre H5 y H7.

En el registro elevado, la misma frecuencia que los caracteriza, genera una distribución distinta en los espacios repartidos a lo largo del tracto vocal. Los dos primeros formantes coinciden en lugar con los armónicos H1 y H2 respectivamente.

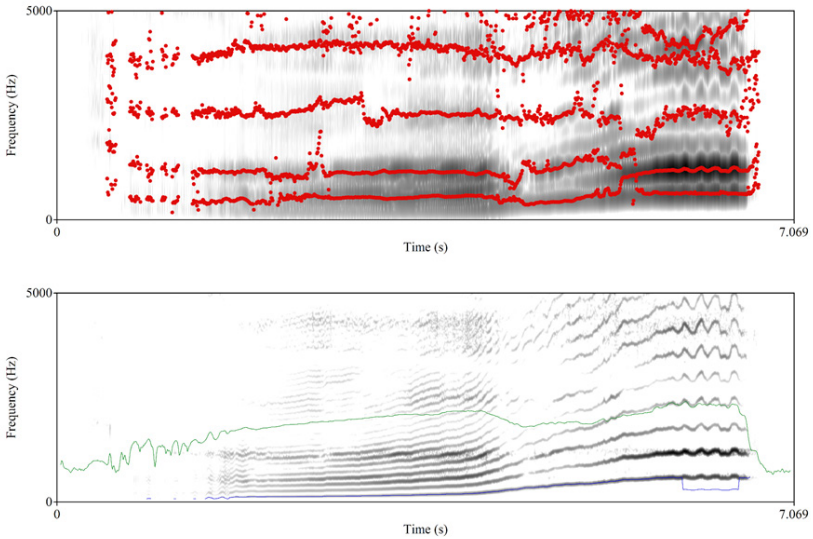

Figura 4. Registro de pulso – modal – falsete. (De arriba abajo) Espectrograma de banda ancha y contorno de formantes, y espectrograma de banda estrecha, contorno de frecuencia e intensidad

En todos los casos anteriores, es posible reconstruir parte de la forma o posición que adopta el tracto vocal al momento de producir el sonido. Por encima de determinados tonos, en registro elevado y silbido, la recuperación no es posible debido a la carencia de información acústica. En sonidos muy agudos, la fundamental resulta tan elevada que los primeros formantes no pueden formarse sino solo a su nivel o por encima de ésta, perdiéndose toda la información que se encuentra debajo.

Los formantes en la zona de transición evidencian modificaciones y acomodaciones propias y necesarias. El cambio más notorio se da entre el pasaje de registro modal al de falsete. Al inicio de la transición, estos parecen acompañar y desplazarse según la elevación de la curva. Una vez establecido el nuevo registro, F1 y F2 sintonizan inmediatamente con armónicos más bajos en categoría ordinal, al incrementar la frecuencia del estímulo.

En el caso de registro de silbido (*ver figura 5*), los dos primeros formantes se funden en uno solo. Además, este nuevo formante es coincidente con la fundamental. Por lo tanto, se pierde doblemente información acústica. El primer formante se funde en el segundo, y el segundo formante se funde en la fundamental.

Sabemos que la distribución de los dos primeros formantes define con cierta claridad en el idioma español la identidad vocal del sonido en cuestión, esta es la razón por la que a falta de definición a nivel de los formantes, la inteligibilidad se ve comprometida en las frecuencias agudas de cualquier registro.

Este puede ser un caso extremo, pero en mayor o menor medida existe deformación en la identidad vocálica en otros registros dependiendo de la frecuencia de la señal.

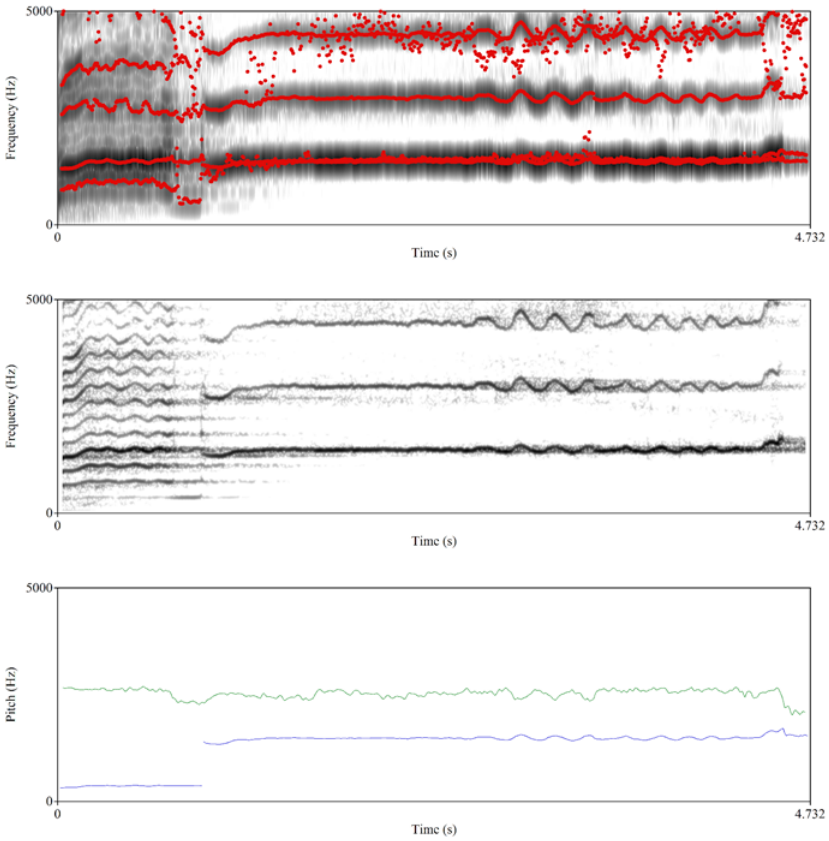

Figura 5. Registro de flauta o silbato. (De arriba abajo) Espectrograma de banda ancha con formantes definidos (líneas rojas), Espectrograma de banda estrecha y contornos de frecuencia (azul) e intensidad (verde).

Conclusiones

Si bien la voz en el ser humano se hace efectiva gracias a un proceso combinado entre leyes aerodinámicas y destrezas neuromusculares, el intercambio no siempre es el mismo ni se cumple de manera idéntica en una misma persona al momento de cantar. Las manifestaciones acústicas son un correlato del comportamiento mecánico generador del sonido en cada uno de los registros.

Por medio de la descripción de la frecuencia es posible describir el comportamiento mecánico pasivo de la fuente y el estado y condición mecánica del generador.

El contorno de intensidad aporta conocimiento sobre el comportamiento mecánico activo de la fuente.

Los armónicos constituyenuna contribución a la identidad del sonido primigenio -timbre- y los formantes dan cuenta de la función del filtro y su relación con el estímulo proveniente de la fuente.

Referencia bibliográfica

Basso, Gustavo. (2009). Percepción auditiva. Buenos Aires. Universidad Nacional de Quilmes Editorial.

Basso, Gustavo. (2001ª). Análisis acústico. La transformada de Fourier en la música. La Plata. Editorial Al Margen.

Castellengo, M., Lamesch, S. y Henrich, N. (2007). Vocal registers and laryngeal mechanisms, a case study: the french "Voix mixte". IX° International Congress on Acoustics.

Cecconello, Luis A. (2012). Registros vocales en Aplicación del análisis acústico en la clínica vocal. Trabajando con Anagraf. Buenos Aires, Editorial Akadia.

Chen, G., Park, S., Kreiman, J. y Alwan, A. (¿?). Investigating the effect of F0 and vocal intensity onharmonic magnitudes: data froom high-speed laryngeal videoendoscopy.

Fric, M., Sram, F. y Svec, J. (¿?) Voice registers, vocal folds vibration patterns and their presentation in videokymography.

Henrich, N., Roubeau, B. y Castellengo, M. (2003). On the use of electroglottography for characterisation of the laryngeal mechanisms. Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference.

Howard, David M. (2009). Acoustics and psychoacoustics. UK, Elsevier Editorial.

Hull. D. (2013). Thyroarytenoid and cricothyroid muscular activity in vocal register control. TESIS

Kob, M., Henrich, N., Herzel, H., Howard, D., Tokuda, I. y Wolfe, J. (2011). Analysing and understanding the singing voice: recent progress and open questions. Current Bioinformatics, vol. 6, N° 3.

Marusso, Adriana S. (2005). Princípios básicos da teoría acústica de producao da fala. Rev. Est. Ling., Belo Horizonte, V. 13, n. 1, p. 19-43.

Mathews, M. y Pierce J. (1980). Harmony and nonharmonic partials. Journal of the Acoustical Society of American, vol. 68.

Mörner, M., Fransson, F. y Fant, G. (1963). Voice register terminology and standard pitch.

Pierce, J. (1991). Periodicity and pitch perception. Journal of the Acoustical Society of American, vol. 90.

Roubeau, B., Henrich, N. y Castellengo, M. (2008). Laryngeal vibratory mechanisms: the notion of vocal register revisited. Journal of voice.

Sacheri, Soledad. (2012). Ciencia en el arte del canto. Buenos Aires, Editorial Akadia.

Sethares, W. A. (1998). Tuning, Timbre,Spectrum, Scale. Londres. Springer-Verlag.

Stross, Brian. (2013). Falsetto voice and observational logic: motivated meanings. Language in society. 42: 2, 139-162.

Sundberg, J. y Högset, C. (1999). Voice source differences between falsetto and modal registers in counter tenors, tenors and baritones…

Titze, I. (2000). Auszüge aus Kapitel 10. Vocal Register. (Text S. 281-82 und 306-308, Illustration S. 293).

Bio autor

Licenciado en fonoaudiología. Egresado de la Facultad de Ciencias Médicas (UNLP). Docente de la cátedra de Foniatria – Carrera de Locución (ICSIS – Instituto de Comunicación Social, Imagen y Sonido – Jujuy). Pasante Investigador del Grupo de Investigaciones en Técnica Vocal – Laboratorio para el estudio de la experiencia musical (LEEM), Facultad de Bellas Artes (UNLP). Doctorando en Fonoaudiología (UMSA).