

**RECOGIDA, INTERPRETACIÓN Y MODELIZACIÓN
DE DATOS AERODINÁMICOS**

MARIA-JOSEP SOLÉ SABATER
Universitat Autònoma de Barcelona
mariajosep.sole@uab.es

RESUMEN

Presentamos tres estudios que ilustran diferentes métodos y técnicas de recogida e interpretación de datos aerodinámicos y cómo estos datos se aplican a cuestiones fonológicas. El primer caso ilustra cómo se pueden deducir configuraciones articulatorias a partir de datos aerodinámicos. El segundo presenta el papel de las perturbaciones aerodinámicas en el estudio del habla, en concreto, el impacto de variaciones de presión oral en la vibración de las cuerdas vocales. El tercer caso ilustra la relación entre la presión subglótica y cambios en la resistencia del tracto oral en la producción de sonidos.

Palabras clave: *aerodinámica, perturbaciones, fonología.*

ABSTRACT

This workshop presents three case studies illustrating different methods and techniques to gather aerodynamic data. In addition, it shows how these data may be interpreted and how they can throw light on phonological questions. The first case illustrates how articulatory configurations may be inferred from aerodynamic data. The second case examines the role of aerodynamic perturbations in speech research, specifically, it addresses how changes in oral pressure facilitate voicing. The third case illustrates the relationship between subglottal pressure and variations in vocal tract impedance in the production of segments.

Keywords: *aerodynamics, perturbations, phonology*

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los estudios fonéticos se centran en la articulación, percepción y acústica de los sonidos, no en los aspectos aerodinámicos. Así pues, una cuestión previa es ¿por qué estudiar el aspecto aerodinámico de los sonidos? La respuesta es sencilla, en primer lugar, porque la conexión entre la articulación y la acústica es la aerodinámica:

Articulación > Variaciones de presión y flujo de aire > Sonido

En segundo lugar, porque los aspectos aerodinámicos están implicados en la creación de la fuente de sonido:

1. en la laringe, por ejemplo, la aspiración o la sonoridad –u obstrucción pulsada del aire pulmonar por las cuerdas vocales, y
2. en las cavidades supralaríngeas, mediante la obstrucción parcial o total del aire por articuladores, por ejemplo, la fricción, los sonidos vibrantes como la [r], [R], o la explosión de las oclusivas.

Dicha fuente de sonido será modulada –es decir, filtrada mediante la intensificación y atenuación de ciertas frecuencias– principalmente en las cavidades supralaríngeas anteriores a la fuente de sonido (*downstream cavities*). Además, la intensidad del sonido y las variaciones de la frecuencia fundamental, que subyacen a importantes aspectos suprasegmentales como el acento, el tono, la declinación final de frase, etc., están relacionadas en ocasiones a diferencias en el volumen de aire expirado y, en otras ocasiones, a ajustes laríngeos.

En tercer lugar, porque los datos aerodinámicos tales como las diferencias de presión en las distintas cavidades (p.ej., oral y subglótica, o oral y faríngea en el caso de los chasquidos o *clicks*), o el volumen de aire espirado, nos dan evidencia indirecta del grado de constricción y coordinación en el tiempo (*timing*) de ciertas constricciones articulatorias de difícil acceso y observación. Por lo tanto, los datos aerodinámicos complementan los datos articulatorios. Por otra parte, las variaciones aerodinámicas tienen consecuencias acústicas y auditivas (p. ej.,

generación de fricción, desonorización), por lo que los datos aerodinámicos también complementan los datos acústicos.

En cuarto lugar, porque hay un conocimiento muy limitado de la fase aerodinámica del habla, de cómo los movimientos articulatorios crean las diferencias de presión y de flujo de aire en las diferentes partes del tracto vocal para crear sonidos audibles. En particular, la especificación de los requisitos aerodinámicos del habla son de suma importancia en la patología del lenguaje.

Otro aspecto crucial es el papel de los factores aerodinámicos en la estructura fonológica. Es ya comúnmente aceptado tanto en publicaciones fonéticas (Ohala 1974, 1983; Lindblom 1990; Browman y Goldstein 1990) como fonológicas (Steriade 1999, Hayes 1999) que las restricciones físicas y auditivas de los mecanismos del habla dan forma a la estructura fonológica, es decir, que la estructura fonológica tiene una base física fonética. Mientras los factores articulatorios y perceptivos en los procesos y estructuras fonológicas han sido ampliamente estudiados y reconocidos, los aspectos aerodinámicos han sido poco estudiados, con la notable excepción del trabajo de Ohala (1976, 1983).

En esta presentación examinaremos cómo los datos aerodinámicos pueden aportar información sobre los procesos de producción del habla, permiten explicar y predecir procesos fonológicos, y pueden ayudar a diferenciar entre diferentes interpretaciones fonológicas. En las secciones siguientes presentamos tres casos que ilustran diferentes métodos y técnicas de recogida e interpretación de datos aerodinámicos y cómo estos datos se aplican a cuestiones fonológicas. El primer caso ilustra cómo se pueden deducir configuraciones articulatorias a partir de datos aerodinámicos. El segundo presenta el papel de las perturbaciones aerodinámicas en el estudio del habla, en concreto, el impacto de variaciones de presión oral en la vibración de las cuerdas vocales. El tercer caso ilustra la relación de la presión subglótica y cambios en la resistencia del tracto oral en la producción de sonidos. Antes de pasar a estos casos, sin embargo, presentaremos unas nociones básicas de los factores aerodinámicos en la producción de sonidos.

2. NOCIONES BÁSICAS

Desde una perspectiva aerodinámica, se puede considerar el tracto vocal como dos cavidades, la cavidad pulmonar (o subglotal) y la cavidad oro-faríngea (o supraglotal) que está en última instancia conectada a la atmósfera. Las dos cavidades están conectadas por la glotis que permite el paso del aire de los

pulmones a la cavidad oral cuando se comprimen los pulmones. La cavidad oro-faríngea está conectada a la atmósfera por la boca que puede obstruir la salida del aire mediante constricciones articulatorias de los labios y la lengua (ver figura 1a). La válvula velofaríngea permite el paso del aire hacia la cavidad nasal y la atmósfera para los sonidos nasales (figura 1b). Así pues, tres válvulas regulan la presión y el flujo de aire: a nivel laríngeo, la válvula glotal (o cuerdas vocales) y, a nivel supralaríngeo, la válvula nasal y la constricción oral.

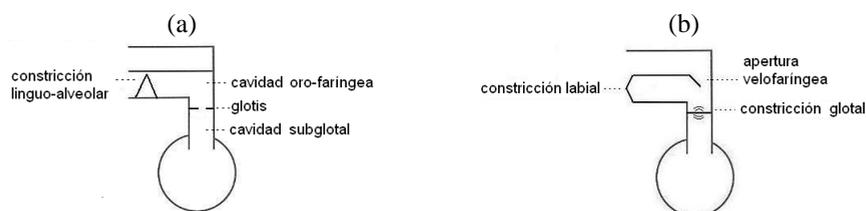


Figura 1. Configuración para (a) fricativa alveolar sorda y (b) labial nasal.

Tanto la cavidad pulmonar como la cavidad oral cambian su volumen durante el proceso del habla. (La cavidad nasal no cambia su volumen y, por tanto, no incide en el movimiento del aire). Como el volumen y la presión varían en relación inversa (a menor volumen, mayor presión para una misma masa de aire), cuando el volumen de estas cavidades disminuye, la presión del aire aumenta y fluye a zonas de menor presión. Así cuando se comprimen los pulmones, la presión subglótica aumenta y el aire fluye hacia la cavidad oral a través de la laringe. Si las cuerdas vocales, situadas en la laringe, están cerradas y con el grado de tensión apropiado, éstas vibran y se produce la sonoridad. Si las cuerdas vocales están abiertas permiten el paso de un gran volumen de aire hacia la cavidad oral. Si están parcialmente abiertas, la impedancia de las cuerdas vocales a la gran columna de aire genera la fricción glotal o aspiración.

Si el aire que fluye de los pulmones a la cavidad oral encuentra alguna obstrucción en la salida a la atmósfera debido a una constricción articulatoria parcial o total, la presión de aire tras la constricción aumenta y se genera turbulencia en las fricativas o una explosión momentánea (*release burst*) para las oclusivas. Habrá movimiento o flujo de aire – entre la cavidad subglótica y la cavidad oral, o la cavidad oral y la atmósfera – siempre que exista una diferencia de presión suficiente. La dirección del aire siempre será de la cavidad de mayor presión a la de menor presión.

3. RESISTENCIA DEL TRACTO VOCÁLICO Y FRICCIÓN

Es conocido que las oclusivas sordas, y en menor grado las sonoras, tienden a africarse cuando van seguidas de segmentos producidos con una cierta constricción articuladora, tales como vocales cerradas, [i, u], semiconsonantes o ‘glides’, [j, w], o aproximantes, [l, ɹ]. Este proceso da lugar a la variación de pronunciación ejemplificada en (1) y, históricamente, a la asibilación de las oclusivas, presentada en (2-3), y a la africación que acompaña la palatalización de las velares, ilustrada en (4-5).

- (1) Inglés *tea* [t^hi:]~[t^si:] ‘te’, *truck* [tʃʌk]~[tʃɹʌk] ‘camión’, *got you* [ˈgɒtʃə] ‘entendido’, *did you go?* [ˈdɪdʒə ˈgou] ‘¿fuiste?’
- (2) Catalan /tj dj/ > /s dz/ Latin *petia* > *peça* [ˈpesə] ‘pieza’, Latin *diurnum* > *jorn* [dʒorn] ‘día’
- (3) Proto Bantu */tima/ > Ikalanga /ts^hima/ ‘pozo’, pero PB*/tima/ > Ikalanga [tima] ‘corazón’
- (4) Latín *cena(m)* [k] > Italiano *cena* [ˈtʃeːna]; Lat. *regia(m)* [g] > *reggia* [ˈreddʒa]
- (5) Dialectos del Tai, Lungchow *kjau*, Po-ai *ɕ̥fau* ‘cabeza’, ‘moño’

Ohala (1983) y Ohala y Solé (en prensa) han propuesto que estos procesos reflejan, de hecho, la fricativización del segmento cerrado ([i u j w l ɹ]) tras oclusiva y no la africación de la oclusiva. La causa de la fricativización se debe a que dichos segmentos ofrecen una resistencia importante a la salida del aire que se ha acumulado durante la oclusión. La alta presión de aire que se crea en la cavidad oral durante la oclusión libera aire a gran velocidad a través de una constricción estrecha lo que resulta en fricción audible. La estrechez de la constricción prolonga sustancialmente la salida de aire, y por tanto, el periodo de fricción. La fonologización de la fricción o la codificación de un segmento africado (en lugar de oclusivo) se debe al análisis, por parte del oyente, de la prolongada fricción como parte de la oclusiva y no del segmento siguiente.

Además, tras una oclusiva sorda las cuerdas vocales empiezan a vibrar más tarde si el segmento siguiente es una vocal cerrada o una ‘glide’ en comparación a vocales más abiertas (Ohala 1976, Chang 1999), es decir, las oclusivas presentan un VOT

más largo cuando van seguidas de vocales cerradas. Esto es debido a la liberación más lenta de la presión oral a través de una constricción más cerrada, y al mayor tiempo que se necesita para disminuir la presión oral y conseguir la diferencia de presión que se requiere para iniciar la sonoridad ($P_{\text{subglótica}} - P_{\text{oral}} > 3\text{-}4\text{cmH}_2\text{O}$; Baer 1975). Esto resulta en un periodo más largo de flujo turbulento o aspiración, que contribuye a la percepción de fricción.

3.1. Experimento

Para contrastar esta hipótesis realizamos el siguiente estudio dirigido a proveer evidencia de la mayor resistencia que ofrecen las vocales cerradas y aproximantes frente a las vocales abiertas a partir de datos aerodinámicos. Una mayor resistencia se evidenciaría si la presión oral de la oclusiva disminuye más paulatinamente, debido a que el aire encuentra una mayor resistencia, y el aire a gran velocidad pasa a través de la constricción por un periodo de tiempo más largo (es decir, la fricción se prolonga), creando la percepción de una africada.

Se recogieron datos acústicos y aerodinámicos de secuencias de oclusivas sordas /p, t, k/ seguidas de vocales cerradas /i:/, abiertas /a:/, glides /j, w/, y aproximantes /l, r/, del tipo [p^hi:], [p^ha:], [pja:], [pja:], [pwa:], [pwa:] en la frase marco 'Say ___ twice'. Se utilizó el sistema PC-quirer para la obtención de los datos acústicos y aerodinámicos. La presión oral se obtuvo mediante un catéter introducido por la nariz, a través de la cavidad nasal, por encima del velo del paladar, y en la cavidad oral, tal como se ilustra en la figura 2. Para la señal aerodinámica se utilizó un filtro pasa-bajo con una frecuencia de corte de 90Hz para deshacernos de los efectos microfónicos. Se obtuvieron datos de tres hablantes. Po = presión oral.

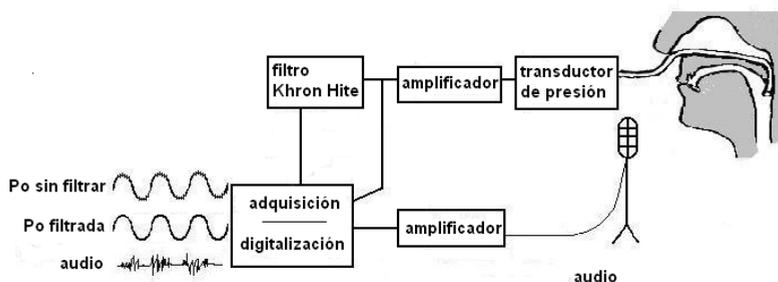


Figura 2. Configuración experimental para la recogida de datos.

3.2. Resultados

Los resultados que se presentan son preliminares dado que solo obtuvimos datos para tres hablantes, relativamente pocas repeticiones para cada secuencia y no han sido aún cuantificados. Se ha de proceder a medir el área bajo la curva de la presión oral que será indicativa del volumen de aire a alta velocidad que ha de pasar por la constricción oral. El análisis de la figura 3 muestra que el impulso de la presión oral de la oclusiva decae más gradualmente y, por lo tanto, durante un periodo de tiempo más largo en las secuencias /pja:/, /pla:/, /pra:/ y /tja:/, /twa:/, /tra:/ en comparación a /pa:/ y /ta:/, debido a que el aire encuentra mayor resistencia en el primer caso. Para estas secuencias el aire pasa a gran velocidad por la constricción creada por la vocal cerrada o la sonante, resultando en fricción audible, durante un periodo de tiempo relativamente largo, creando la percepción de una africada. La mayor duración de la fricción tras la explosión de las oclusivas seguidas de /i:, j, w, r, l/ es particularmente observable en el caso de las secuencias alveolares en la figura 3.

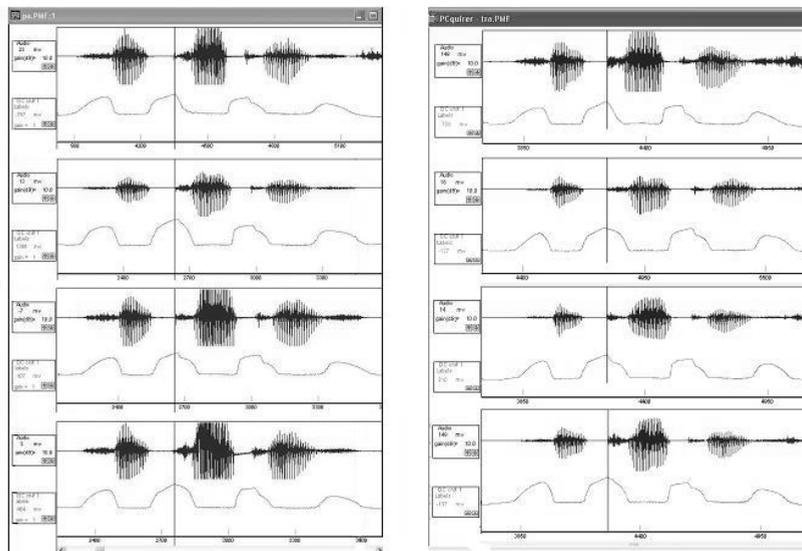


Figura 3. Audio y presión oral para las secuencias aspiradas /pa:/, /pja:/, /pla:/, /pra:/ (izq.) y /ta:/, /tja:/, /twa:/, /tra:/ (dra) en la frase 'Say__twice'. La línea vertical está alineada con la explosión de la oclusiva.

Los datos obtenidos son consistentes con la interpretación de que la asibilación o africación de oclusivas seguidas por vocales cerradas o sonantes es un efecto aerodinámico.

4. PERTURBACIONES AERODINÁMICAS. NASALIZACIÓN Y SONORIDAD

Es conocido que la nasalización, o el escape de aire por la nariz, favorece la sonoridad en segmentos adyacentes (Rothenberg 1968, Bell-Berti 1993). Este efecto tiene consecuencias fonológicas tales como:

1. La sonorización postnasal (*postnasal voicing*, Hayes y Stivers 1996), es decir, la tendencia de las obstruyentes sordas a volverse sonoras tras nasal, que se manifiesta en alternancias morfofonológicas, ilustradas en (6); en procesos de asimilación de sonoridad en oclusivas tras nasal, (7); y en ejemplos de cambio fonológico, (8) (ver Solé (en prensa) para las referencias relevantes).

(6) Japonés *mi-* ‘ver’ *mi+te* ‘viendo’ *mi+ta* ‘vió’
 yom- ‘leer’ *yon+de* ‘leyendo’ *yon+da* ‘leyó’

(7) Italiano meridional *bianco* [ˈbjɛŋɡɔ] ‘blanco’

(8) Armenio clásico [ajntɛt] ‘allí’ > New Julfa [əndiɛɾ]

2. El mantenimiento de las oclusivas sonoras –y del contraste de sonoridad– exclusivamente en posición postnasal (mientras que la oclusiva se ensordece y el contraste de sonoridad se neutraliza tras vocal), ejemplo (9):

(9) Mallorquín /b/ *sembl* [bl] ‘creo’ *dobl* [pl] ‘doble’
 /p/ *umpl* [pl] ‘lleno’ *acopl* [pl] ‘acoplo’

3. El desarrollo de sonidos nasales no etimológicos junto a una oclusiva sonora pero no sorda, ilustrada en la prenasalización (10) o

postnasalización (11) fonética de las oclusivas sonoras, y en el lenguaje infantil (12) (ver Solé, Sprouse y Ohala 2008 para las referencias relevantes).

(10) Bola [b] ~ [ᵐb] *bebe* 'mariposa' [g] ~ [ᵑg] *aga* 'canao'

(11) Lancashire [ˌuːz ə ˈwɛdn] *she's wed* [ˈkɔː ə ðɪ ˈleŋŋ] *calf of thy leg*

(12) Inglés [bent] por *bed* [bed] 'cama'; Griego [ᵑgol] por [gol] 'gol'

4. La distribución alofónica de las oclusivas sonoras, por ejemplo, en español y catalán. Mientras la realización más común es fricativa o aproximante – las cuales permiten mantener la sonoridad mediante el escape del aire a través de la oclusión incompleta – la realización tras nasal es oclusiva, ver (13), es decir, la nasalidad permite mantener la vibración de las cuerdas vocales durante la oclusión oral.

(13) Castellano /b d g/ → [b d g]/ N__*sombra, anda, mango*
[β ð ɣ]/ V__*sobra, hada, mago*¹

Los factores físicos responsables de que la nasalización favorezca la sonoridad son los siguientes. La vibración de las cuerdas vocales se mantiene si éstas tienen (i) la posición (juntas) y nivel de tensión adecuados, y (ii) si el aire fluye a través de ellas. Para que haya flujo de aire a través de la glotis, la diferencia de presión a través de las cuerdas vocales ha de ser superior a 1-2cmH₂O. Es decir, la presión subglótica ha de ser al menos 1-2cmHO mayor que la presión oral (figura 4, tiempo 1). Durante una oclusiva, el aire se acumula en la cavidad oral y en pocas decenas de milisegundos (dependiendo del lugar de articulación y volumen de la cavidad oral) la presión oral aumenta, se iguala a la presión subglótica y el flujo de aire a través de las cuerdas vocales, y la sonoridad, cesa (figura 4, tiempo 2).

¹ Propiamente, la distribución de la variante oclusiva en castellano es la siguiente: tras nasal, tras oclusiva (e.g., *abdicar* [bd]), tras /l/ en el caso de /d/ (e.g., *aldea* [ld]), y es opcional tras pausa (e.g., ## *dame* [ˈdame] ~ [ˈðame]).

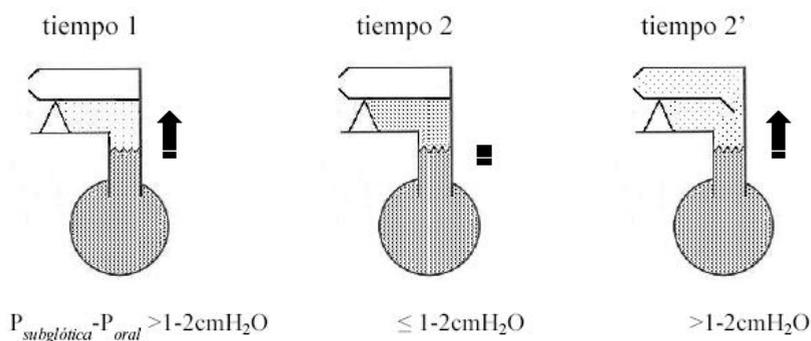


Figura 4. Flujo de aire a través de la glotis cuando la diferencia de presión es mayor que $1-2\text{cmH}_2\text{O}$.

Como se puede apreciar, la sonoridad cesa debido exclusivamente a factores aerodinámicos (desonorización pasiva) y no a cambios laríngeos. La sonoridad se prolonga en contexto nasal debido al escape de aire nasal antes de la completa elevación del velo del paladar, lo que reduce la presión oral y facilita el flujo de aire a través de la glotis, tal y como se ilustra en la figura 4, tiempo 2'. La nasalización durante toda o parte de la constricción oral de las oclusivas sonoras también se utiliza como una estrategia para mantener la sonoridad (Solé en prensa). El objetivo de nuestro estudio es proveer datos experimentales de este proceso aerodinámico. Para esto, examinaremos el efecto de las variaciones de presión oral (variable independiente) en la sonoridad de las oclusivas (variable dependiente).

4.1. Experimento

En este estudio se analizaron las oclusivas desonorizadas del inglés, [b̥ d̥ g̥], que se dan en posición inicial y final de frase (p.ej., ## *boy*, *lab* ##), y en secuencias de oclusivas (*lab boy*). Se recogieron datos aerodinámicos, laringográficos y acústicos de tres hablantes pronunciando palabras con /b d g/ en estas posiciones. La presión oral se obtuvo mediante un catéter nasal conectado a un transductor de presión, como se ilustra en la figura 2 arriba. Los hablantes también tenían un catéter de 6mm de diámetro interior (área 28.27mm^2) colocado a lo largo del surco bucal y ligeramente curvado por detrás de los molares, de manera que accedía a la cavidad oral (ver figura 5 izquierda).



Figura 5. A la izquierda, configuración de la recogida de datos durante las perturbaciones aerodinámicas. A la derecha, el experimentador controla la apertura aleatoria de la pseudo-válvula nasal.

Cuando el catéter estaba abierto, el aire escapaba a través del catéter, simulando la apertura velofaríngea. El catéter se abría y se cerraba aleatoriamente, controlado por el investigador, durante la producción de las palabras por parte del sujeto (ver figura 5 derecha). Los hablantes también llevaban auriculares con ruido rosa para evitar «feedback» auditivo cuando el catéter oral estaba abierto. Ver la configuración experimental en la figura 5.

4.2. Resultados

El tipo de datos que se obtuvieron se presentan en la figura 6, donde se muestran los datos acústicos, laringográficos y aerodinámicos para los estímulos 'boy' y 'lab', sin y con escape de aire pseudo-nasal. A la izquierda de la figura 6a, se observa el incremento de presión oral durante la oclusiva sonora de 'boy', la sonoridad sin embargo no empieza hasta 30ms después de la explosión de la oclusiva, es decir, la /b/ de 'boy' es desonorizada y tiene un VOT de +30ms. A la derecha de la figura 6a se presenta una repetición de 'boy' con apertura velofaríngea (catéter abierto), la presión oral presenta un incremento menor (dado que el aire escapa por la apertura) y la sonoridad empieza mucho antes, 75ms antes de la explosión (VOT de -75ms). La figura 6b muestra los datos para las oclusiva sonora final de frase en la palabra 'lab'. El ejemplo de la izquierda muestra como aumenta la presión oral para la oclusiva final y la presencia de sonoridad durante aproximadamente 1/3 parte de la constricción oclusiva. A la derecha, cuando el catéter está abierto, el incremento de presión es menor y la vibración laríngea se prolonga durante más de la mitad de la constricción.

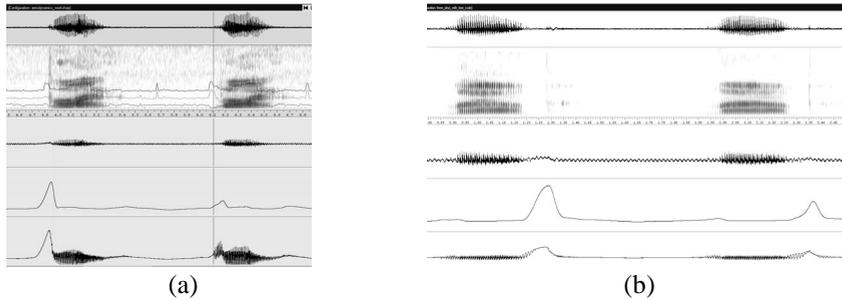


Figura 6. (a) Onda acústica, espectrograma (0-8kHz), trazo laringográfico, presión oral filtrada y sin filtrar para dos repeticiones de la palabra 'boy', sin apertura del catéter y con apertura. (b) Lo mismo para la palabra 'lab'.

La figura 7 muestra la correlación entre la presión oral y la sonoridad (VOT o vibración laríngea durante la constricción) para cada una de las oclusivas sonoras en posición inicial (p.ej., boy, game) y final de frase (p.ej., labb, bag). Los resultados indican que cuando se reduce la presión oral debido al escape nasal, la sonoridad se anticipa en las oclusivas iniciales, como muestran los mayores valores negativos de VOT en 7a, y se prolonga en las oclusivas finales de frase, como se ve en los valores más altos de sonoridad durante la constricción en 7b. El escape nasal también prolonga la sonoridad en secuencias de consonante (p.ej., 'labboy'). Los resultados indican que el escape nasal, al reducir la presión oral, aumenta la diferencia de presión a través de la glotis y facilita la vibración laríngea durante la constricción.

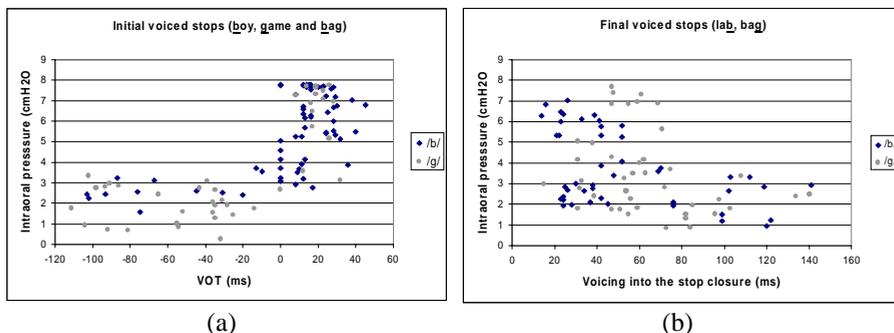


Figura 7. Vibración laríngea en función de la presión oral de la oclusiva inicial de frase (a) y final de frase (b).

Los resultados también indican que los hablantes tenían la glotis cerrada, en posición de vibración, durante la oclusiva y que la oclusiva se desonoriza pasivamente (es decir, por motivos aerodinámicos). Cuando se reduce la presión oral, y se incrementa la diferencia de presión y el flujo de aire a través de la glotis, las cuerdas vocales empiezan a vibrar o continúan vibrando sin ningún ajuste laríngeo.

En conclusión, los resultados son consistentes con la interpretación de que el escape de aire a través de la nariz facilita la vibración de las cuerdas vocales y puede ser explotado por los hablantes para mantener o prolongar la sonoridad. Es necesario puntualizar que el escape nasal es una maniobra para facilitar la vibración de las cuerdas vocales y no es un segmento nasal deliberado. Sin embargo, la nasalización fonética puede ser reinterpretada por el oyente como un segmento nasal intencionado y así quedar codificados en la forma fonológica (Ohala 1983) como probablemente ha tenido lugar en los ejemplos 10-12 de arriba.

5. CAMBIOS EN LA PRESIÓN SUBGLÓTICA Y EFECTOS SEGMENTALES

El tercer caso trata la cuestión de si existe control de la función respiratoria (o la presión subglótica, P_s) para los distintos sonidos, sílabas o efectos suprasegmentales (Ohala 1990, Demolin 2007). Por ejemplo, se ha sugerido que ciertos segmentos, como las consonantes aspiradas y la /h/, se caracterizan por un incremento en la presión subglótica ('heightened subglottal pressure', HSAP; Chomsky y Halle 1968). También se ha propuesto que las sílabas se producen con un aumento momentáneo de la presión pulmonar o 'chest pulse' (Stetson 1951), es decir, que existen incrementos de presión y flujo de aire para cada sílaba. Stetson apoya su propuesta en datos aerodinámicos y electromiográficos.

La producción de aspectos suprasegmentales como el acento, el tono, la entonación o la declinación entonativa también se han atribuido a variaciones en la presión subglótica frente a la interpretación más comúnmente aceptada que asocia dichos efectos suprasegmentales a la actividad laríngea (Hirano y Ohala 1969, Netsell 1969, Erickson, Baer y Harris 1983; Ohala 1990). Así por ejemplo, Stetson (1951), Fonagy (1958), Ladefoged (1962), y Lieberman (1967), utilizando datos fisiológicos y electromiográficos, observan incrementos en la actividad muscular respiratoria y en la P_s en las sílabas acentuadas. Es decir, parece que las diferencias de P_s se correlacionan con el acento. Los incrementos de presión subglótica observados en las sílabas acentuadas, sin embargo, se pueden asociar a una mayor

resistencia glotal, tal como lo indica una menor cantidad de aire flujo de aire (Klatt, Stevens y Mead 1968), en las sílabas acentuadas frente a las inacentuadas.

La declinación de frecuencia ('f₀ declination' o tendencia de la f₀ a disminuir a medida que avanza la frase) (Collier 1974, Lieberman y Blumstein 1988) y el descenso de la frecuencia fundamental a final de frase, que caracteriza a las declarativas (Lieberman 1967, Lieberman y Blumstein 1988), también se han atribuido a un descenso de la P_s a final de frase.

Todas estas propuestas atribuyen un delicado control de la P_s en la producción del habla que va mucho más allá de proveer una fuente de energía sonora. La visión más comúnmente aceptada en la actualidad, sin embargo, es que la contribución del sistema respiratorio se limita a facilitar una presión subglótica (es decir, un cierto volumen de aire) relativamente constante durante el grupo tónico (para un determinado nivel de intensidad). ¿Cómo se explican, pues, las variaciones de presión subglótica observadas a partir de datos fisiológicos (p.ej., volumen pulmonar), aerodinámicos, o electromiográficos (p.ej., actividad de los músculos intercostales)? Dichos incrementos y decrementos momentáneos de presión subglótica se pueden asociar a cambios en la resistencia de las válvulas que controlan la salida del aire pulmonar: la glotis y la constricción oral. Con el objetivo de obtener información adicional sobre las variaciones de presión subglótica y su posible relación con variaciones en la resistencia en la glotis o en el tracto vocal realizamos el siguiente estudio.

5.1. Método

Se recogieron datos con el fin de observar las variaciones de presión subglótica asociadas (1) a segmentos que ofrecen gran resistencia a la salida de aire, como por ejemplo, oclusivas, fricativas y vibrantes, y (2) a segmentos que ofrecen muy poca resistencia y permiten la libre salida de aire, como la [h] o la aspiración de las oclusivas.

La obtención de datos de presión subglótica (para nuestros propósitos presión subglótica es igual a presión alveolar) tiene cierta dificultad y, como consecuencia, no existe una gran cantidad de este tipo de datos. Las dos técnicas más utilizadas son la punción traqueal y el pletismógrafo. Nosotros utilizamos el pletismógrafo de la Universidad de California, Berkeley. El pletismógrafo se utiliza en medicina para medir el volumen pulmonar y en fonética para obtener una medida indirecta

de la presión subglótica. El pletismógrafo es una cámara cerrada con un volumen fijo de aire donde se coloca el sujeto (ver figura 7). Se miden los cambios de volumen asociados a la compresión o expansión del aire en el interior del tórax (o presión alveolar/subglótica) mediante los cambios de presión en el aire que rodea al sujeto dentro de la caja. Como se trata de una gran cantidad de aire con gran inercia, la respuesta dinámica de la señal siempre está algo retardada con respecto a la señal acústica.



Figura 7. Recogida de datos pletismográficos.

Se obtuvo la presión oral, la señal pletismográfica y la señal acústica. En la primera sesión, la presión oral se obtuvo mediante un tubo situado entre los labios (por lo que sólo se obtuvo presión oral para las consonantes labiales, figura 8); en la segunda sesión se obtuvo mediante un catéter nasal, figura 9 (descrito en 3.1), por lo que se obtuvo la presión oral para todos los segmentos. Tres hablantes leyeron frases con oclusivas aspiradas y no aspiradas, [h]s, fricativas, vibrantes y sonantes.

5.2. Resultados

Los resultados presentados en la figura 8 muestran la característica curva de la P_s en un grupo respiratorio. Un periodo de iniciación (que termina aproximadamente a los 0.9 segundos) en el que hay un incremento rápido de presión subglótica, debido a la retracción elástica pulmonar. Esta rápida retracción pulmonar, que da lugar al rápido incremento de presión, es frenada por la acción muscular resultando en una presión relativamente constante durante la mayor parte de la frase (de 0.9-2.4 segs.). La expiración sobre la que se sobrepone el grupo tónico acaba con un rápido descenso de la presión subglótica (de 2.4-2.65 segs.) (Ohala 1990; Slifka

2000). Las variaciones en la P_s que se observan pueden explicarse en términos de los requisitos aerodinámicos de ciertas consonantes y el consiguiente control de las constricciones glotales y orales.

En la frase *Papa may turn Murray, Patsy* [^hp^hɑ:pə meɪ t^hɛɪn 'mʌɹi p^hætʃi] de la figura 8, observamos los dos primeros incrementos en la P_s (canal 3) correspondientes a las [p]s de *Papa*. Estos dos picos corresponden a los incrementos de presión oral (P_o) en el canal (4) ya que, como hemos dicho, durante las oclusivas y fricativas sordas, la glotis está abierta y la cavidad subglotal y la oral forman una sola cámara de aire, por lo que P_s es igual a P_o .

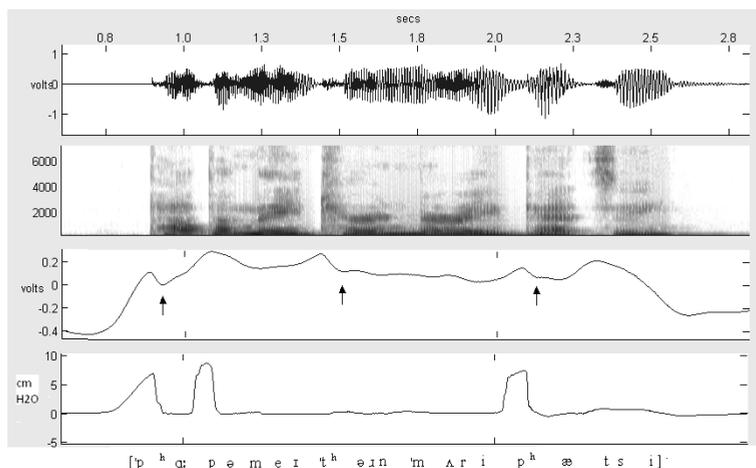


Figura 8. (1) Onda acústica, (2) espectrograma (0-8kHz), (3) señal pletimográfica, y (4) presión oral (en $\text{cm H}_2\text{O}$) para la frase 'Papa may turn Murray, Patsy'.

Lo mismo ocurre con las otras oclusivas y fricativas sordas de la frase, la [t] de 'turn', y la [p] y [tʃ] de 'Patsy', si bien la presión oral sólo se recogió para las labiales. Las obstruyentes se articulan con una constricción oral (y nasal) completa, o con un estrechamiento substancial, lo que causa un aumento de la presión oral ya que el aire sigue fluyendo de los pulmones. A medida que aumenta la presión oral, el aire deja de fluir a través de la glotis (el flujo de aire depende de la diferencia de presión) y la presión subglótica aumenta. Así pues, la presión subglótica aumenta debido a la resistencia a la salida del aire que encuentra en la obstrucción oral.

Por otra parte, puede observarse un rápido descenso de la P_s (indicada por flechas en la figura 8) tras la explosión de las oclusivas sordas aspiradas, la primera [p^h] de *Papa*, la de *Patsy*, y la [t^h] de ‘turn’. Este rápido decremento de la P_s se debe a que, durante el periodo de aspiración, no hay ninguna resistencia a la libre salida del aire pulmonar: la glotis está abierta y la constricción oral se abre súbitamente, por lo que el aire sale sin ninguna resistencia, lo que reduce la presión subglótica.

La figura 9 muestra la frase *Say ‘arra’ again*, donde se puede observar que no sólo las obstruyentes aumentan la presión oral y la subglótica, sino que la [r] vibrante también obstruye la salida de aire intermitentemente en la cavidad oral (ver los tres incrementos en la presión oral correspondientes a los tres contactos linguales, alrededor de los 1,2 segundos) y, al ser sonora, también en la glotis, lo que ofrece gran resistencia a la salida de aire y aumenta la presión subglótica.

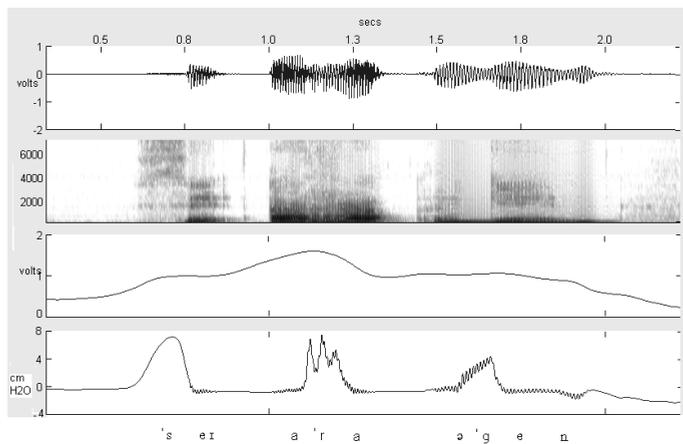


Figura 9. (1) Onda acústica, (2) espectrograma (0-8kHz), (3) señal pletismográfica, y (4) presión oral (en cm H₂O) para la frase ‘Say ‘arra’ again’.

Los datos indican que las variaciones de presión subglótica se deben a cambios en la resistencia de la glotis o la constricción oral a la salida del aire pulmonar, es decir, son efectos mecánicos, y no se deben al control de la presión subglótica para ciertos segmentos.

6. CONCLUSIÓN

Hemos ilustrado la obtención y interpretación de datos aerodinámicos aplicados a ciertas cuestiones fonológicas (secciones 3 y 4) y al control de la producción de sonidos (sección 5). Por falta de espacio no podemos tratar la modelización de los parámetros aerodinámicos en la versión escrita, pero se puede consultar Solé, Sprouse y Ohala (2008) y Sprouse (2008). Esperamos haber demostrado que los datos aerodinámicos pueden aportar información sobre los procesos de producción del habla, pueden ayudarnos a inferir configuraciones articulatorias (p.ej., grado de constricción) y a explicar resultados acústicos (p.ej., generación de turbulencia), como se ilustra en la sección 3. Los datos aerodinámicos permiten contrastar hipótesis sobre las causas fonéticas de la variación fonológica y, dado que la variación aerodinámica tiene consecuencias acústicas y auditivas puede tener un papel importante en los procesos de cambio fonológico. Por último, hemos presentado una técnica que permite manipular las condiciones aerodinámicas (presión oral) y observar si estas variaciones tienen un efecto correspondiente en las variables dependientes, siguiendo el característico paradigma experimental.

AGRADECIMIENTOS: Este estudio ha sido financiado por los proyectos de investigación HUM2005-02746, BFF2003-09453-C02-C01 del Ministerio de Ciencia y Tecnología, España, y el grupo de investigación SGR 2005-2008 de la Generalitat de Catalunya.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAER, T. (1975): *Investigation of phonation using excised larynxes*, Unpublished Ph.D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- BELL-BERTI, F. (1993): «Understanding Velic Motor Control: Studies of Segmental Context», en M. K. Huffman y R. A. Krakow (eds.), *Nasals, Nasalization, and the Velum*, San Diego, Academic Press, 63-85.
- CHANG, S. C. (1999): «Vowel-dependent VOT variation», *Proceedings of the 14th ICPHS*, San Francisco, Vol. 2, pp. 1021-1204.
- CHOMSKY, N. y M. HALLE (1968): *The Sound Pattern of English*, New York, Harper and Row.
- COLLIER, R. (1974): «Laryngeal muscle activity, subglottal air pressure, and the

- control of pitch in speech», *Status Report on Speech Research*, Haskins Labs, SR-39/40, pp. 137-170.
- DEMOLIN, D. (2007): «Phonological universals and the control and regulation of speech production», en M. J. Solé, P. Beddor y M. Ohala (eds.): *Experimental approaches to phonology*, Oxford, Oxford University Press, pp. 75-92.
- ERICKSON, D.; T. BAER y K. S. HARRIS (1983): «The role of the strap muscles in pitch lowering», en D. M. Bless y J.H. Abbs (eds.): *Vocal fold physiology. Contemporary research and clinical issues*, San Diego, College-Hill Press, pp. 279-285.
- FONAGY, I. (1958): «Elektrophysiologische Beiträge zur Akzentfrage», *Phonetica*, 2, pp. 12-58.
- HAYES, B. (1999): «Phonetically driven phonology: the role of Optimality Theory and inductive grounding», en M. Darnell, E. Moravcsik, F. Newmeyer, M. Noonan, y K. Wheatley (eds.): *Functionalism and Formalism in Linguistics*. Amsterdam, John Benjamins, pp. 243-285.
- HAYES, B. y T. STIVERS (1996): *A phonetic account of postnasal voicing*. Ms., Dept. of Linguistics, UCLA.
- HIRANO, M. y J. OHALA (1969): «Use of hooked-wire electrodes for electromyography of the intrinsic laryngeal muscles», *Journal of Speech and Hearing Research*, 12, pp. 362-373.
- KLATT, D.H.; K. N. STEVENS y J. MEAD (1968): «Studies of articulatory activity and airflow during speech», en A. Bouhuys (ed.): *Sound Production in Man*. Annals of the New York academy of Sciences, 155, pp. 42-54.
- LADEFOGED, P. (1962): «Subglottal activity during speech», *Proceedings of the 14th ICPhS*, The Hague, Mouton, pp. 73-91.
- LIEBERMAN, P. (1967): *Intonation, perception and language*, Cambridge, MIT Press.
- LIEBERMAN, P. y S. BLUMSTEIN (1988): *Speech physiology, speech perception and acoustic phonetics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- LINDBLOM, B. (1990): «On the Notion of Possible Speech Sound», *Journal of Phonetics*, 18, pp. 135-152.

-
- NETSELL, R. (1969): «Subglottal and intraoral air pressures during the intervocalic contrast of /t/ and /d/», *Phonetica*, 20, pp. 68-73.
- OHALA, J. (1974): «Experimental Historical Phonology», en J. Anderson y C. Jones (eds.): *Historical Linguistics*, Vol 2, Amsterdam, North-Holland, pp. 353-389.
- OHALA, J. (1976): «A model of speech aerodynamics», *Report of the Phonology Laboratory*, University of California, Berkeley, Vol. 1, pp. 93-107.
- OHALA, J. (1983): «The origin of sound patterns in vocal tract constraints», en P. MacNeilage (ed): *The Production of Speech*, New York, Springer Verlag, pp. 189-216.
- OHALA, J. (1990): «Respiratory Activity in Speech», en W. J. Hardcastle y A. Marchal (eds.): *Speech Production and Speech Modelling*, Kluwer Academic Publishers, pp. 23-53.
- OHALA, J. y M.J. SOLÉ (en prensa): «Turbulence and phonology», en S. Fuchs (ed.): *Turbulence*.
- ROTHENBERG, M. (1968): *The breath-stream dynamics of simple-released-plosive production*, Basel, Karger.
- SLIFKA, J. (2000): *Respiratory constraints on speech production at prosodic boundaries*, tesis doctoral, MIT, Cambridge, MA.
- SOLÉ, M. J. (en prensa): «Acoustic and aerodynamic factors in the interaction of features. The case of nasality and voicing», en M. Vigario, S. Frota y M. Joao Freitas (eds.): *Interactions in Phonetics and Phonology*, Amsterdam, John Benjamins.
- SOLÉ, M. J.; R. SPROUSE y J. OHALA (2008): «Voicing control and nasalization», en P. Warren (ed.): *LabPhon 11 abstracts*, Wellington, N. Z., pp. 129-130.
- SPROUSE, R. (2008): «A discrete time aerodynamic model of the vocal tract», *Proceedings of the 8th International Seminar on Speech Production*, Strasbourg.
- STERIADE, D. (1999). «Phonetics in Phonology: The Case of Laryngeal Neutralization», en M. Gordon (ed.), *Papers in Phonology 3 (UCLA Working Papers in Linguistics 2)*, Los Angeles, Univ. of California, pp. 25-145.
- STETSON, R.H. (1951): *Motor phonetics*, Amsterdam, North Holland Publish. Co.
-