



Análisis de impedancia bioeléctrica (AIB) en la producción animal. Revisión



Larissa Luísa Schumacher ^{a*}

Julio Viégas ^a

Gilmar dos Santos Cardoso ^a

Anderson Bertoluzzi Moro ^a

Tiago João Tonin ^a

Stela Naetzold Pereira ^a

Leonardo Tombesi da Rocha ^a

Ana Luiza Van Caeneghen ^a

Janaína Vargas Teixeira ^a

^a Federal University of Santa Maria. Department of Animal Science. Santa Maria, Brazil.

*Autor de correspondencia: larissaluisaschumacher@gmail.com

Resumen:

El análisis de impedancia bioeléctrica (AIB) es un método basado en los diferentes niveles de oposición al flujo de una corriente iónica a través de los diversos tejidos corporales. Los resultados se expresan mediante medidas primarias de resistencia (Rs) y reactancia (Xs). A partir de estas medidas, se aplican ecuaciones para determinar el ángulo de fase (AF) y la impedancia (Z). El análisis de bioimpedancia ha sido indicado como un método fiable y preciso para determinar la composición corporal y el estado nutricional en los seres humanos. El AIB se ha adaptado recientemente para ser aplicado en la producción animal. Por lo tanto, el objetivo de esta revisión es proporcionar un análisis sobre el uso potencial de la impedancia bioeléctrica en la producción zootécnica. A través del AIB se pueden establecer correlaciones entre las medidas bioeléctricas y la composición de los tejidos de los cadáveres de los cerdos, los bovinos, los ovinos, los bufalinos y los peces.

En este sentido, entre el número creciente de demandas destaca la de contar con métodos más precisos y rentables para evaluar la composición corporal en el sector zootécnico, entre los que el análisis de la impedancia bioeléctrica demostró ser una tecnología prometedora y mínimamente invasiva para reemplazar los métodos tradicionales.

Palabras clave: Composición corporal, Impedancia, Tecnología, Producción zootécnica.

Recibido:02/10/2020

Aceptado:10/03/2021

Introducción

La búsqueda de la excelencia en la calidad dentro de la cadena zootécnica en Brasil y en el mundo ha sido constante. Para mantener el statu quo, debe hacerse hincapié en el uso de tecnologías que garanticen la bioseguridad de los alimentos en la producción animal adaptable a las exigencias de los consumidores.

En la literatura existen diferentes métodos para evaluar la calidad y composición de los más diversos productos cárnicos y lácteos. Sin embargo, muchos de estos métodos, como la disección de los cadáveres y la composición física y química, requieren una mano de obra especializada y cualificada, un equipamiento de última generación y unos fondos económicos considerables.

Por lo tanto, la investigación y la exploración de tecnologías y metodologías son fundamentales para ayudar a evaluar eficazmente la calidad de los productos zootécnicos. Ante ello, el análisis de impedancia bioeléctrica (AIB) se caracteriza por ser una tecnología de medición rápida, mínimamente invasiva, relativamente rentable y menos subjetiva. El AIB muestra un gran potencial para predecir la composición química de los tejidos de las canales de animales de granja⁽¹⁾ así como para evaluar la calidad de la leche bronca de vaca⁽²⁾.

El análisis AIB se basa en el principio de que los tejidos del cuerpo tienen diferentes impedancias, es decir, una oposición al flujo de una corriente iónica. Dicha impedancia está determinada por las medidas primarias de resistencia (R_s) y reactancia capacitiva (X_c). El flujo de la corriente eléctrica se opone al vector R_s , cuando pasa por entornos intra y extracelulares⁽³⁾. Del mismo modo, X_c también muestra la oposición al flujo de corriente causado por la capacitancia producida por las membranas celulares⁽⁴⁾.

Por ello, la búsqueda de métodos alternativos se hace necesaria para determinar y mantener la calidad de los productos zootécnicos si se tiene en cuenta la coyuntura actual.

En este sentido, esta revisión del artículo pretende relacionar y desvelar el principio del AIB y su uso en la producción animal.

Bioimpedancia eléctrica

Los tejidos corporales tienen diferentes niveles de conductividad y oposición al flujo de una corriente iónica debida a su composición químico-física⁽⁴⁾. Con base en este principio, el análisis de la bioimpedancia eléctrica se realiza como método de evaluación de la composición corporal, del estado nutricional, de la cantidad total de agua corporal y de las propiedades fisiológicas, y como indicador de varias situaciones clínicas y patológicas, como el pronóstico del cáncer, la desnutrición y la insuficiencia cardíaca⁽⁵⁾.

Este método es relativamente rentable, mínimamente invasivo y de fácil manejo y aplicación. También ofrece una medición rápida, ya que tarda aproximadamente 5 seg en obtener los datos⁽⁶⁾. Además, a diferencia de los métodos tradicionales, el AIB no requiere el sacrificio de los animales para evaluar la composición de los tejidos y el nivel energético, a menos que se realice una disección cuando corresponda⁽⁷⁾. Los principios del AIB se han aplicado y adaptado a la producción animal para determinar la composición de los tejidos de los cerdos⁽⁸⁾, los bovinos⁽⁹⁾, los ovinos^(10,11) y los bufalinos⁽¹²⁾, así como para evaluar la composición de la leche cruda de vaca⁽²⁾.

Para realizar el AIB, es necesario pasar una corriente iónica a lo largo del cuerpo del animal. La corriente suele ser alterna de baja amplitud (500 a 800 μA) y alta frecuencia, las cuales no pueden ser sentidas por el cuerpo. Normalmente se necesitan cuatro electrodos (un sistema tetrapolar) para aplicar la corriente: un par de electrodos produce la excitación de la corriente mientras que el otro par mide la diferencia de potencial alcanzada⁽¹³⁾. En los sistemas biológicos, humanos o animales, el desplazamiento de la corriente se produce a través de los iones disueltos en los fluidos corporales, especialmente los iones de sodio y potasio.

La literatura muestra que cuando se aplica la corriente al bioimpedómetro, los diferentes tejidos animales presentan diferente oposición al flujo de la corriente iónica, lo que se denomina impedancia (Z). El valor de la impedancia depende de la frecuencia⁽⁴⁾ y es la composición resultante de dos vectores denominados resistencia (R_s) y reactancia (X_c).

Cuando la corriente se aplica, se dispersa a través de los iones de los fluidos corporales y es inversamente proporcional a su motilidad y directamente proporcional al área que atraviesa. A partir de los valores primarios de R_s y X_c obtenidos por el bioimpedómetro, se utiliza el modelo matemático propuesto por Lukaski *et al*⁽¹⁴⁾, que depende de la longitud del conductor, de la frecuencia utilizada y del área de la sección transversal, es decir, del volumen del cuerpo: $Z = (R_s^2 + X_c^2)^{0.5}$.

La magnitud de la impedancia se calcula mediante la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de la resistencia y la reactancia combinadas al circuito⁽¹⁴⁾; todas las medidas se expresan en ohmios (Ω).

La resistencia se produce por la oposición a la corriente eléctrica cuando fluye a través de los medios intra y extracelulares⁽³⁾. Lo contrario puede obtenerse mediante la conductancia (C). Según Eickemberg *et al*⁽⁴⁾, la conductancia está en relación inversa con la resistencia ($C=1/R_s$), es decir, cuanto mayor sea la cantidad de líquido, más débil será la oposición del flujo de corriente. Por lo tanto, la resistencia muestra un comportamiento opuesto a la cantidad de agua en el cuerpo y al nivel de hidratación en estos ambientes.

Los fluidos intracelulares están compuestos por el núcleo y el citoplasma, formados en su mayoría por sales, proteínas y agua, los cuales se consideran buenos conductores eléctricos. Asimismo, los materiales conductores, como los iones K y PO_4 ⁽¹⁵⁾, también forman los fluidos extracelulares.

Lo mismo ocurre con los tejidos magros formados por músculos y vísceras, que son buenos conductores de la corriente iónica debido a su gran cantidad de agua y electrolitos. Los tejidos adiposo y óseo, en cambio, conducen la corriente iónica con menor intensidad, que los músculos y las vísceras, pues son muy resistentes⁽¹⁶⁾.

Si los tejidos fueran homogéneos, la oposición sería sólo resistiva. Sin embargo, los tejidos son heterogéneos y muestran otro tipo de oposición, la reactancia, que se origina en aquellos tejidos que tienen composición y características de condensadores eléctricos (condensadores) en su estructura producida por las membranas celulares. La capacitancia celular es conocida como una propiedad de almacenamiento de energía (para concentrar electrones) en las interfaces de los tejidos y las membranas celulares durante un corto período, teniendo la característica de retrasar la corriente eléctrica⁽¹⁷⁾.

Las membranas citoplasmáticas constan de dos capas de material proteico con propiedades hidrofílicas, que resultan ser buenas conductoras de la electricidad, y una capa aislante de lípidos (la capa dieléctrica). Esas membranas actúan como si fueran un condensador (X_c)⁽⁴⁾. Esta evaluación es un indicador de la cantidad de masa magra del cuerpo, que puede relacionarse con la estructura y la función de las membranas celulares, ya que cada componente del tejido responde de manera diferente al flujo de una corriente alterna aplicada^(18,19).

El método AIB considera que un conductor cilíndrico singular con longitud y área transversal homogéneas representa el cuerpo del animal. Sin embargo, tal afirmación es objetable toda vez que la composición y las áreas transversales de la sección se consideran heterogéneas⁽²⁰⁾.

Por lo tanto, es necesario relacionar el AIB con métodos probados en la literatura para determinar las composiciones químicas y físicas, de modo que sea posible validar el

método y sus respectivas ecuaciones de predicción, identificar y reducir los errores y hacer que la tecnología sea más fiable y precisa⁽²¹⁾.

Dado que el análisis AIB también puede proporcionar información sobre la composición corporal, deben tenerse en cuenta factores como la temperatura del cuerpo y del entorno, y la longitud del segmento corporal. Según Hartmann *et al*⁽²²⁾, la temperatura y la longitud afectan significativamente a las mediciones de resistencia y reactancia, lo que se explica por el aumento de temperatura que potencia la vibración de los átomos.

Teniendo en cuenta la naturaleza de los fluidos biológicos, la temperatura presenta un coeficiente negativo para la resistencia, es decir, cuando la temperatura disminuye la resistencia aumenta. En consecuencia, la conductancia disminuye proporcionalmente⁽⁶⁾. Otras variables también pueden interferir en la concentración sérica de electrolitos, los puntos de colocación de los electrodos, los tipos de electrodos utilizados, la formación de los usuarios en la aplicación del bioimpedómetro, el uso de materiales no conductores, la calibración del dispositivo, así como la raza, la edad y el peso^(3,10). En este sentido, los valores de impedancia están asociados a la cantidad total de agua y a la composición de los tejidos corporales de los animales⁽⁶⁾. Además, la impedancia también puede utilizarse como método indirecto para evaluar la calidad bacteriológica de la leche bronca.

Ángulo de fase

Cuando se aplica una corriente eléctrica a los tejidos biológicos, se forma un desvío en cuanto la corriente atraviesa las membranas celulares. Una parte de las membranas tiene la capacidad de almacenar energía, lo que significa que debería haber un retraso observable en el flujo de la corriente eléctrica debido a la capacitancia, con lo cual se produce una disminución de la tensión de la corriente⁽²³⁾. Esta característica origina un cambio de fase al no existir sincronía en el condensador entre las variaciones de corriente y tensión, lo cual genera una transformación geométrica del ángulo de la capacitancia que se denomina ángulo de fase (AF)⁽⁴⁾.

Según Cintra *et al*⁽³⁾, el ángulo de fase determinado mediante el AIB es un método para medir la relación existente entre la resistencia y la reactancia en circuitos en serie o en paralelo. Eickemberg *et al*⁽⁴⁾ explicó que puede haber una variación de 0° a 90°, en la que el 0° implica un circuito resistivo sin ninguna membrana celular ni degradación, y el 90° corresponde a un circuito capacitivo en el que todas las membranas celulares tienen líquido extracelular.

El AF depende de la capacitancia y se asocia negativamente a la resistencia⁽²⁴⁾. Se relaciona con la calidad, el tamaño y la integridad celular, ya que su variación indica alteraciones en la composición corporal, en el funcionamiento de la membrana o en las condiciones de salud humana⁽⁴⁾.

Por tanto, el AF puede cuantificarse geométricamente mediante la fórmula $AF = (Xc/R)$, calculada por la relación entre el arco tangente de Xc y Rs, cuyo resultado se expresa en radianes, multiplicándose por $(180^\circ/\pi \cong 57,296)$ para convertir en grados⁽²⁵⁾. La ecuación, según Baumgartner *et al*⁽²⁴⁾, es la siguiente: $AF = [\tan^{-1}(Xc/R) \times 180^\circ/\pi]$.

Eickemberg *et al*⁽⁴⁾ establecen como valor de normalidad para los individuos sanos una variación entre 4 y 15 grados. Según Selberg y Selberg⁽²⁶⁾, cuando los valores del AF son mayores, los valores de reactancia muestran la misma tendencia. Estos, a su vez, se relacionan con las buenas condiciones de salud y las membranas celulares intactas.

Por el contrario, cuando los índices de AF son bajos, existe una relación con la reactancia, que los asocia a la muerte celular, a la reducción de la permeabilidad selectiva de la membrana celular e incluso a la existencia o empeoramiento de alguna enfermedad⁽²⁷⁾. Cuando se realizó la evaluación en peces, Cox y Heintz⁽²⁸⁾ observaron que el ángulo superior a 15° indicaba que los animales estaban en buenas condiciones de salud, mientras que el ángulo inferior a 15° indicaba que las condiciones de salud estaban comprometidas.

En este contexto, la AF ha sido ampliamente utilizada como indicador del estado nutricional en seres humanos y en canales de animales, al igual que de la evaluación de la calidad y de la adulteración de la leche cruda de vaca^(1,2,9).

El AIB para la evaluación de la composición corporal y las canales de los animales de granja

La evaluación de la composición corporal se utiliza con frecuencia para mejorar la gestión y el control zootécnico en el sector de los animales de granja, lo que permite al técnico responsable y al criador seleccionar los animales con mayor rendimiento, adaptándolos al mercado de consumo⁽¹⁶⁾. Los métodos más comúnmente utilizados para predecir la composición y la canal de los animales vivos o sacrificados suelen ser largos, caros e invasivos⁽¹⁰⁾. Por ello, la investigación de nuevas metodologías y tecnologías precisas es fundamental para cumplir con dicha estimación. En este sentido, el AIB es un método mínimamente invasivo y relativamente barato que se ha utilizado en el sector zootécnico para estimar la composición corporal de los animales de granja.

En los seres humanos, según Eickemberg *et al*⁽⁴⁾ El AIB se utiliza para evaluar el índice de masa corporal (IMC), ya que toma en cuenta la asociación entre el peso y la altura al cuadrado del paciente ($IMC = \text{peso}/\text{altura}^2$). Basándose en los principios de la ley de Ohm, algunos investigadores⁽²⁹⁾ relacionaron el área de la sección transversal con el volumen del cuerpo, describiendo que el volumen de una masa conductora puede ser el cociente entre la altura al cuadrado y la resistencia ($V = \text{altura}^2 / Rs$).

Con el objetivo de reproducir en los animales las ecuaciones de volumen utilizadas en humanos, sustituyeron la altura por la longitud de la canal⁽³⁰⁾. Berg and Marchello⁽³¹⁾ sustituyeron la altura por la longitud del conductor, representada por la distancia entre los

electrodos que detectan la corriente. En otros trabajos⁽⁹⁾ asociaron las composiciones corporales de los animales y las densidades resistiva (DRs) y reactiva (DXc) y describieron la relación entre el peso, el volumen resistivo y el capacitivo, expresado en Kg²/cm² ohmios.

Al evaluar el uso potencial del AIB para determinar la composición de la parte blanda de las canales de corderos calientes y frías, se comprobó que las mediciones de AIB obtenidas en canales fríos anticipan sus componentes con mayor precisión que las obtenidas en canales calientes⁽³²⁾. Este hecho se explica por la disminución de la conductancia en respuesta a la pérdida de fluidos durante el enfriamiento, y los cambios en la distribución de los electrolitos entre los entornos intracelular y extracelular en los tejidos.

Se pueden utilizar agujas de acupuntura o hipodérmicas como electrodos para realizar las mediciones. Se deben introducir en el animal a una profundidad de penetración constante, permitiendo la transmisión sin interrupción de la señal a través de los tejidos⁽¹¹⁾. Además, hay que tener especial cuidado cuando los animales se colocan sobre superficies no conductoras.

Para poder establecer la relación entre las variables del AIB y la composición corporal de los animales, se deben determinar en el laboratorio los niveles de humedad, proteína, materia mineral y lípidos, entre otros. La posición de los electrodos con la que supuestamente se debían obtener las medidas primarias del AIB realizado en la espalda de los animales mostró resultados más precisos que las lecturas ventrales debido a los tejidos diferenciados que muestra cada compartimento⁽²¹⁾.

No se encuentran cambios significativos en las variables de AIB ni en las membranas o compartimentos extracelulares justo después del sacrificio, considerando que la temperatura muestra poca variación. Sin embargo, cuando la canal comienza a enfriarse, se producen cambios bioquímicos en las membranas celulares debido al efecto de *rigor mortis*, ya que la canal pierde sus gradientes iónicos con el aumento de la temperatura y el tiempo de maduración⁽³³⁾.

Según se ha mencionado⁽³³⁾, este proceso es consistente con los mecanismos enzimáticos, ya que las capas de fosfolípidos de las membranas sufren oxidación y dan a la membrana un aspecto poroso. Este mecanismo descrito por Damez *et al*⁽³⁴⁾ provoca un aumento de la permeabilidad, facilitando el flujo y la mezcla de los fluidos intra y extracelulares. Se ha informado⁽³⁵⁾ que los valores de Rs y Xc en canales frías de cerdos eran aproximadamente de 6 a 11 veces superiores a los de los cerdos vivos y observaron que la Rs disminuía proporcionalmente a la temperatura.

Altmann *et al*⁽¹⁰⁾ obtuvieron una correlación muy débil entre la reactancia y la composición de la canal, lo que también se puede encontrar en los estudios sobre los corderos⁽³¹⁾. Otros autores⁽⁸⁾ hallaron una correlación positiva entre la resistencia, el peso

vivo y la cantidad de grasa en los cerdos. En consecuencia, se produjo un aumento de la resistencia debido a la disminución de la cantidad total de agua en el cuerpo, lo que dio como resultado un aumento de peso y grasa en los cerdos.

Gibbs *et al*⁽³⁶⁾ encontraron que el estrés produce cambios en la masa libre de grasa y en el tejido blando libre de grasa cuando utilizaron el AIB para determinar las alteraciones corporales en corderos recién nacidos expuestos al estrés térmico intrauterino. Asimismo, se observó que el AIB mostró potencial para estimar el marmoleo en bovinos en Japón⁽³⁷⁾.

Berg y Marchello⁽³¹⁾ utilizaron las siguientes variables en sus modelos: peso de las canales frías y calientes, longitud de la canal y temperatura asociada a Rs y Xc. Algunos investigadores⁽⁹⁾ informaron que obtuvieron una relación débil entre la mayoría de los componentes de las canales. Moro *et al*⁽¹⁾ añadieron el ángulo de fase, el volumen bioeléctrico, la densidad resistiva y reactiva a sus ecuaciones para asociarlas con los componentes de la canal, ya que la densidad resistiva puede relacionarse con estos componentes y la densidad reactiva podría indicar una asociación con la concentración de masa magra.

Además, al utilizar el análisis AIB como técnica de predicción de la canal y la musculatura de las cabras ligeras, se observó⁽³⁸⁾ que la Rs era la única variable independiente que determinaba la grasa subcutánea con prescripción. Sin embargo, al incluir en el modelo la longitud de la canal combinada con la Rs, obtuvieron un nivel de determinación aún mayor, de 0.943 ($P < 0.01$). La inserción en la ecuación del peso de la canal fría combinada con la Rs reportó una precisión de 0.998 para predecir la cantidad de músculo.

En un trabajo reciente⁽³⁹⁾, los autores mostraron el potencial que tienen los parámetros evaluados por AIB para medir las características de la carne: la combinación de Rs y Xc para predecir la grasa intramuscular demostró un ajuste del 79.3 %, mientras que para las características físico-químicas los mejores ajustes fueron en la longitud del sarcómero, con un 64.4 %, y en la fuerza de cizallamiento, con un 60.5 %.

La precisión de los modelos de predicción mejoró con la inclusión de información adicional. El Cuadro 1 muestra algunos modelos junto con sus respectivas variables, que se ajustan mejor para aumentar la capacidad de determinar las ecuaciones.

Cuadro 1: Ecuaciones de predicción a partir de evaluaciones *in vivo*, de la bioimpedancia, en canales de bovino, bufalino, cordero y cerdo

Autores	Variable dependiente	Ecuaciones	R ²
Bovino			
Velazco <i>et al.</i> , 1999	Masa libre de grasa	$Y = 0.130 PC - 0.039 L + 0.0002 L^2 - 0.007 Z - 9.320 Vol2 + 9.507 Vol3 + 35.555 IMC - 34.249$	0.98
Bufalino			
Sarubbi <i>et al.</i> , 2008	Masa libre de grasa	$Y = 28.10 + 0.972PV + 12.21$	0.94
Ovino <i>in vivo</i>			
Berg y Marchelho, 1994	Masa libre de grasa	$Y = 0.555 PV - 0.247 Rs + 0.390 Xc + 16.260$	0.77
	Sin grasa	$Y = 0.555 PV - 0.247 Rs + 0.390 Xc + 16.260$	0.78
Moro <i>et al.</i> , 2019	Tejido adiposo	$Y = 0.555 PV - 0.247 Rs + 0.390 Xc + 16.260$	0.78
	Proteína (kg)	$Y = -0.70 + 0.05DRs + 0.03V + 0.07AF$	0.91
	Grasa (kg)	$Y = -2.11 + 0.10DRs + 0.04V$	0.87
Avril <i>et al.</i> , 2013	Masa magra (kg)	$Y = -1.90 + 0.11V + 0.18DRs + 0.31AF$	0.89
	Masa libre de grasa (kg)	$Y = 18.8 + 0.023 PV - 10.5 L^2/R$	0.85
	Masa grasa (kg)	$Y = 1.43 + 0.001 PV - 0.81 C$	0.65
Canales de Cordero			
Berg y Marchelho, 1994	Masa libre de grasa	$Y = 0.439 PCC + 0.167 L - 0.134 Rs + 0.191 Xc - 0.258 T + 19.914$	0.77
		$Y = 0.583 PCF + 0.150 L - 0.027 Rs + 0.013 Xc - 0.287 T + 1.836$	0.77
	Sin grasa	$Y = 0.433 PCC + 0.124 L - 0.114 Rs + 0.175 Xc - 0.211 T + 17.811$	0.79
	Tejido adiposo	$Y = 0.555 PCF + 0.096 L - 0.022 Rs + 0.008 Xc - 0.278 T + 3.868$	0.77
Cerdo			
Swantek <i>et al.</i> , 1992	Masa libre de grasa	$Y = 0.486 PV - 0.881 Rs + 0.480 L + 0.880 Xc + 7.950$	0.81
	Masa libre de grasa (fría)	$y = 0.267 PCF - 0.158 Rs + 0.519 L + 0.103 Xc + 20.04$	0.83

Variables independientes: IMC= PC / L^2 ; IMC= índice de masa corporal; PC= peso corporal; C= conductancia; PCF= peso de la canal en frío; PCC= peso de la canal en caliente; L= longitud; PV= peso vivo; AF= ángulo de fase; Rs= resistencia; DRs= densidad resistiva; T= temperatura; V= volumen bioeléctrico; Vol2= $L^2 / (Rs^2 + Xc^2)^{0.5}$; Vol3= volumen geométrico; Xc= reactancia; Z= impedancia.

Es posible evaluar el AIB en toda la extensión de las canales. Sin embargo, algunas restricciones presentes durante la medición de la bioimpedancia hicieron surgir la necesidad de evaluar el análisis del AIB por segmentos, es decir, por pequeñas secciones en las canales.

Sin embargo, se reportó recientemente⁽³²⁾ que el análisis de la bioimpedancia resultó ser una tecnología más prometedora que los métodos tradicionales para proporcionar información precisa y satisfacer las demandas del mercado de consumo, ya que proporciona una forma fácil y rápida de determinar la composición de grasa, proteína y agua en los cortes comerciales.

Evaluación mediante el AIB en peces

La bioimpedancia eléctrica puede ser una herramienta útil no sólo para los estudios científicos sobre los peces sino también para la industria piscícola, ya que permite evaluar rápidamente la composición corporal de una gran cantidad de peces vivos⁽⁴⁰⁾. Además, su uso podría reducir entre 20 y 41 veces el costo total de los procedimientos de evaluación en comparación con los métodos tradicionales de análisis químico.

Dado que esta tecnología no es letal, permite monitorear los cambios en la composición corporal de los peces a medida que crecen y hacen cambios en la dieta acordes a la evaluación, mediante un AIB, de las respuestas a las interacciones biológicas⁽⁴¹⁾. Otro hallazgo importante⁽⁴²⁾ es que el AIB puede ser útil para analizar las variaciones bióticas y abióticas que pueden afectar a los componentes del cuerpo de los animales, que no pueden ser sacrificados, ya que son especies en peligro de extinción.

Algunos autores⁽⁴³⁾ afirman que la geometría corporal de los peces favorece el uso de la impedancia como estimación de la composición corporal, ya que ella basta una sola medida para representar de manera precisa todo el cuerpo ($R^2= 0.96$).

El objetivo es utilizar los análisis AIB para determinar la composición corporal de los peces. Zaniboni-Filho *et al.*⁽⁴⁴⁾ trataron a los peces con una dieta compuesta por diferentes índices lipídicos (8.90 vs 18.68 %) para producir individuos con distintas composiciones corporales. Los resultados mostraron correlaciones más fuertes para los análisis dorsales de humedad y resistencia en serie (0.87); proteína y resistencia en serie (0.87); ceniza y reactancia en paralelo (0.82). Se observaron correlaciones débiles entre los datos del AIB por lectura ventral y los contenidos lipídicos (0.44). Estos autores destacaron que el AIB demostró ser un método adecuado para determinar la composición corporal de los peces de acuerdo con los autores mencionados anteriormente.

Arantes⁽⁷⁾ probó el uso de la técnica de bioimpedancia en el pez boga (*Leporinus obtusidens*) y se encontró un alto nivel del coeficiente de determinación obtenido en la región lateral. Los coeficientes fueron respectivamente de 0.92, 0.85 y 0.87 entre el método AIB y los parámetros de composición corporal obtenidos por el método químico,

tales como la humedad, las proteínas y el extracto etéreo. Según estos resultados, el AIB demostró ser válido para estimar la composición corporal y calificar los niveles de energía del pez boga.

La eficacia del AIB para evaluar la composición de los peces es beneficiosa para la gestión de la pesca y las investigaciones ecológicas. Permite evaluar el flujo energético entre y dentro de las poblaciones, además de valorar las respuestas sobre los cambios ambientales.

Si bien los métodos tradicionales de medición son muy precisos, consumen mucho tiempo, son caros y son letales. Por otro lado, el método AIB constituye una técnica rápida y no letal que explica el 80 % de la variabilidad en el porcentaje de lípidos de los peces, demostrando una alta precisión en la estimación y seguimiento de las condiciones corporales de los peces que viven en los ríos del territorio interior de Alaska⁽⁴⁵⁾. Además, la técnica puede ser beneficiosa para determinar los cambios bioenergéticos relacionados con las variaciones del entorno.

Fitzhugh *et al*⁽⁴⁶⁾ utilizaron el AIB para establecer una relación con la energía disponible para la reproducción de los peces marinos. Los autores observaron que el ángulo de fase se mantenía por debajo de los 15° después de la temporada alta de desove. Otros autores⁽⁴⁰⁾ informaron que el AIB mostró potencial para medir el estado reproductivo, la madurez y el desarrollo gonadal, ya que en estas condiciones los peces presentan alteraciones en su porcentaje de grasa corporal.

Según algunos autores⁽²⁸⁾, los ángulos de fase superiores a 15° indicaban que los peces estaban sanos, mientras que los valores inferiores a 15° mostraban peces con una salud comprometida debido a cambios en el ambiente acuícola. A diferencia de los modelos utilizados para otros animales, el ángulo de fase mostró una alta productividad entre los peces.

También se encuentran cambios en el ángulo de fase cuando los peces se enfrentan a un largo período de ayuno. El ayuno obliga al organismo a utilizar los nutrientes almacenados para satisfacer sus necesidades energéticas⁽⁴⁷⁾. La utilización de los nutrientes almacenados provoca cambios en los fluidos intra y extracelulares, pérdida de proteínas corporales, deshidratación celular progresiva y disminución de los ángulos de fase. Además, Zavadlav *et al*⁽⁴⁸⁾ sugirieron estimar la duración del almacenamiento y las propiedades sensoriales de las muestras de calamar con mediciones de AF, dado que mostraron una estrecha correlación.

Por otra parte, se observaron⁽⁴⁹⁾ correlaciones débiles y no significativas entre AF, Rs y Xc y los componentes de la composición corporal, y, según se reportó, el motivo de esta débil correlación es que la metodología del AIB no fue capaz de detectar alteraciones en la composición corporal de los peces. Este hecho corrobora los resultados obtenidos por otros autores⁽⁵⁰⁾, según los cuales las medidas morfológicas estimadas por AIB en los

peces que se enfrentan a la amenaza de extinción al habitar en regiones desiertas fueron redundantes y se requiere de precaución en la evaluación de campo, ya que presenta una gran sensibilidad.

Según Cox *et al*⁽²¹⁾, el pescado puede mantenerse en hielo hasta 9 h después de sacrificado sin que se alteren los valores de R_s o X_c . Los retrasos en la congelación afectan primero a la X_c , y luego a la R_s y al AF. Este orden se debe a que la X_c representa la integridad de la membrana celular, que después de 12 h comienza a hincharse ante el *rigor mortis*. Así, la membrana celular se rompe liberando líquido intracelular en espacios extracelulares.

Para satisfacer la demanda del mercado de consumo, se ha comprobado que es posible definir la calidad, la frescura y el reblandecimiento muscular de la trucha arco iris por medio de la impedancia y durante su almacenamiento en hielo⁽⁵¹⁾. Los mismos autores describieron que el procedimiento permitió detectar el índice de *rigor mortis* a través de la impedancia, condición en la que se evidenció una fuerte correlación negativa entre el *rigor mortis* y el potasio (K) ($r = -0.938$, $P < 0,01$) y se encontró una fuerte correlación positiva con $r = 0.981$ ($P < 0,01$) respecto a la dureza. Yuan *et al*⁽⁵²⁾, describen algunas similitudes que demuestran que el análisis de bioimpedancia arrojó una buena correlación con el valor de K tras 24 h de almacenamiento en hielo, lo que sugiere que el AIB refleja eficazmente el cambio en los compuestos bioquímicos relacionados con la frescura de la carne de pescado.

Para reducir los errores durante la investigación, se recomienda que la muestra mínima sea de 60 peces y que haya una capa de grasa mínima del 29 % entre los peces a fin de obtener correlaciones ≥ 0.80 . Por lo tanto, los resultados podrían mostrar una mayor fiabilidad para estimar la composición corporal de los peces⁽⁴⁰⁾.

Sin embargo, la evaluación de las fuentes potenciales de errores y variaciones durante las mediciones de BIA es un paso importante en el desarrollo del protocolo para garantizar la aplicación de los datos obtenidos por este método. Champion *et al*⁽⁴²⁾ evaluaron algunos desafíos que presenta la técnica, la cual para que sea eficaz, los autores sugieren algunos criterios a seguir: la ubicación anatómica de la inserción del electrodo; el tamaño de los peces y la variación entre especies; la temperatura del entorno/del cuerpo; el tiempo transcurrido entre la captura y la muerte de los peces; la degradación del tejido biológico post-mortem; la normalización del método de captura para reducir el estrés fisiológico.

Según se ha comentado⁽²¹⁾, el cambio de los electrodos de la parte dorsal a la ventral de un pez modifica no sólo las distancias entre los electrodos, sino también los tipos de tejidos que se examinan. Se han identificado mejores correlaciones entre el AIB y los componentes del tejido cuando los electrodos se colocaron a lo largo de la línea dorsal⁽⁵³⁾.

El hecho de que los peces tengan escamas grandes y gruesas podría dificultar el contacto entre la piel y el electrodo, por lo que habría que extraer algunas escamas. En resumen, el uso del AIB en peces ha mostrado resultados prometedores para estimar la composición corporal. Sin embargo, se necesitan más estudios para desarrollar protocolos y ecuaciones de predicción para mejorar la precisión y la aplicabilidad de esta técnica hasta un nivel que permita su uso en el campo y en la industria.

Evaluación de la leche bovina mediante el AIB

La mayoría de los análisis actuales para verificar la calidad, la composición o incluso la adulteración de la leche se valen de métodos analíticos y se llevan a cabo en laboratorios certificados. Sin embargo, en el entorno de un laboratorio es difícil realizar pruebas y ofrecer predicciones en tiempo real a los técnicos. Por lo tanto, es importante desarrollar nuevas metodologías para controlar la composición y la calidad de la leche a fin de cumplir con las expectativas del mercado de consumo.

Es útil y prometedor utilizar las propiedades eléctricas de la leche. Felice *et al*⁽⁵⁴⁾ sugirieron un método de cuantificación de bacterias en la leche bronca de vaca basado en la variación de la capacitancia eléctrica. Mabrook *et al*⁽⁵⁵⁾ observaron que la conductancia eléctrica disminuye a medida que aumenta el porcentaje de grasa en la leche. Se reportó⁽⁵⁶⁾ que al aumentar la temperatura de la leche, la movilidad y el número de iones en la solución también aumentaron, provocando una disminución de Z. Esto valida los hallazgos de otros autores⁽²⁾, que reportaron resultados similares.

La grasa de la leche puede considerarse un obstáculo para el flujo de la corriente eléctrica, ya que está formada por grandes glóbulos cubiertos por una membrana fina y no conductora. La leche con un alto porcentaje de grasa mostró una alta resistencia y, en consecuencia, una baja conductividad⁽⁵⁷⁾.

También es necesario señalar la fuerte correlación entre la conductividad (C) y el recuento de células somáticas (RCS) de la leche. El aumento del C en la leche es directamente proporcional al aumento de la inflamación de la ubre y del RCS. Esta inflamación provoca una alteración de la permeabilidad de los tejidos, lo que se traduce en un aumento del flujo de iones Na⁺ y Cl⁻ de la sangre al interior del lumen alveolar de la glándula mamaria⁽⁵⁸⁾.

Se observaron fuertes correlaciones entre las variables Rs, Xs, C, Z y AF y los componentes sólidos-no grasos totales en la leche bronca de vaca, las cuales coinciden también con el coeficiente de determinación de las ecuaciones de predicción⁽²⁾. En el mismo estudio, cuando la temperatura de la leche estaba a 5 °C, la media de Z era de 147 ohmios y 1.21 % de grasa. Veiga *et al*⁽⁵⁹⁾ encontraron diferentes valores medios de Z en la leche entera (219.56 ohmios), semidesnatada (203.57 ohmios) y desnatada (170.08 ohmios) cuando analizaron la bioimpedancia eléctrica de la grasa de la leche de vaca. Otros autores⁽⁶⁰⁾ informaron de valores medios de 89 ohmios para Z.

Se desarrolló un sensor de espectroscopía de impedancia para detectar la adulteración de la leche basado en las medidas de AF⁽⁶¹⁾. En este estudio, el AF disminuyó cuando se añadió agua del grifo. Cuando los valores de pH cambiaron a una solución básica, el AF y la conductividad también disminuyeron. Cuando se añadió urea y suero de leche, el AF y la conductividad mostraron un aumento. Esto se debe a que las variables tienen la misma naturaleza. En otras palabras, la naturaleza del cambio en el AF es la misma de la conductividad.

Durante *et al*⁽⁵⁶⁾ observaron que la adulteración de la composición de la leche bronca de vaca y de la leche UHT (de ultra alta temperatura) difería principalmente en la variable resistencia. La leche bronca mostró poca variación frente a la adulteración por peróxido de hidrógeno. Sin embargo, la adulteración estaba presente en las muestras de leche UHT. Este hecho estaba posiblemente relacionado con el índice de grasa y la falta de homogeneidad de la leche bronca. En las muestras de hidróxido de sodio se percibió una tendencia a disminuir la resistencia debido a una mayor presencia de iones de sodio, lo que demuestra que el sistema de espectroscopía arrojó resultados consistentes en cuanto a la adulteración de la leche de vaca.

Las metodologías para identificar la composición, la adulteración y la conductividad de la leche⁽⁵⁶⁾ utilizando la espectroscopía de impedancia⁽⁶²⁾ y los conductivímetros son diferentes del AIB. Es importante destacar que la técnica de espectroscopía de impedancia puede proporcionar datos sobre la estructura y la composición de las propiedades de la leche mediante diferentes frecuencias eléctricas. El AIB, por su parte, utiliza una corriente alterna de baja amplitud (500 a 800 μ A) y alta frecuencia (50 kHz).

A la hora de analizar la bioimpedancia de la leche de vaca deben tenerse en cuenta aspectos como la raza, la fase de la lactancia, la genética y la nutrición, las frecuencias de ordeño, la edad del animal, así como los receptores y los tipos de electrodos.

En este sentido, el uso de la espectroscopía o simplemente de la bioimpedancia de una única frecuencia son técnicas prometedoras, que podrían proporcionar resultados rápidos y rentables sobre la composición, la calidad y la posible adulteración de la leche de vaca.

Conclusiones

El creciente aumento de las exigencias del mercado de consumo en materia de seguridad alimentaria, bienestar y composición de los productos de origen animal pone de manifiesto la necesidad de investigar métodos precisos y rentables que aseguren la calidad. El análisis de bioimpedancia, por lo tanto, demostró ser una tecnología prometedora, rápida, relativamente barata y mínimamente invasiva para caracterizar y predecir la composición corporal de los animales domésticos y la calidad de la leche bovina bronca, mostrando una gran capacidad para sustituir los métodos tradicionales. Sin embargo, para ampliar el uso del AIB, es importante destacar la necesidad de

controlar, en la medida de lo posible, las posibles fuentes de errores y variaciones, independientemente de la especie utilizada para definir los protocolos y estandarizar el análisis. Además, es necesario seguir investigando para evaluar la interacción del AIB con la variación de los entornos más diversos y el estado nutricional. Para que la información y los modelos sean más precisos, se recomienda asociar los datos del AIB con los métodos de modelización y los paquetes estadísticos. Es de esperar que, en un futuro próximo, el AIB pueda utilizarse tanto en el campo como en las plantas industriales.

Agradecimientos

A la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por la beca concedida a la primera autora.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés con el trabajo presentado en este artículo de revisión.

Literatura citada:

1. Moro AB, Pires CC, Silva LP, Dias AMO, Simões RR, Pilecco VM, *et al.* Prediction of lamb body composition using in vivo bioimpedance analysis. *Meat Sci* 2019;(50):1-6.
2. Schumacher LL, Viégas J, Naetzold S, Tonin TJ, Rocha L, Cauduro L, *et al.* Use of electrical bioimpedance analysis to evaluate the quality of bovine raw milk. *S Afr J Anim Sci* 2019;(49):728-734.
3. Cintra TCF, Canola JC, Borges NC, Carciofi AC, Vasconcelos RS, Zanatta R. Influência de diferentes tipos de eletrodos sobre os valores da bioimpedância corporal e na estimativa de massa magra (MM) em gatos adultos. *Ci Anim Bras* 2010;(11):149-155.
4. Eickemberg M, Oliveira CC, Roriz AKC, Sampaio LR. Bioimpedância elétrica e sua aplicação em avaliação nutricional. *Ver Nutr* 2011;(24):883-893.
5. Bera TK. Bioelectrical impedance methods for noninvasive health monitoring: A review. *J Med Eng* 2014;1-28.
6. Berg EP, Neary MN, Forrest JC, Thomas DL, Kauffman RG. Assessment of lamb carcass composition from live animal measurement of bioelectrical impedance or ultrasonic tissue depths. *J Anim Sci* 1996;(74):2672-2678.
7. Arantes TB. Bioimpedância como ferramenta de análise da composição corporal de Piava, *Leporinus obsutidens*. [Dissertação de Mestrado]. Brasil, DF: Universidade Federal de Santa Catarina; 2014.

8. Daza A, Mateos A, Ovejero I, Bote CJC. Prediction of body composition of Iberian pigs by means bioelectrical impedance. *Meat Sci* 2006;(72):43-46.
9. Zollinger BL, Farrow RL, Lawrence TE, Latman, NS. Prediction of beef carcass salable yield and trimmable fat using bioelectrical impedance analysis. *Meat Sci* 2010;(84):449-454.
10. Altmann M, Pliquett V, Suess R, Borell E. Prediction of lamb carcass composition by impedance spectroscopy. *J Anim Sci* 2004;(82):816-825.
11. Moro AB, Pires CC, Silva LP, Menegon AM, Venturini RS, Martins AA. Prediction of physical characteristics of the lamb carcass using in vivo bioimpedance analysis. *Animal* 2019;(13):1744-1749.
12. Sarubbi F, Báculo R, Balsarano B. Bioelectrical impedance analysis for the prediction of fat-free mass in buffalo calf. *Animal* 2008;(2):1340–1345.
13. Grimnes S, Martinsen O. *Bioimpedance and bioelectricity basics*. 2nd ed. Oxford, UK: Elsevier-Academic Press; 2008.
14. Lukaski HC, Johnson PE, Bolonchuk PE, Lykken G. Assessment of fat-free mass using bioelectrical impedance measurements of the human body. *Am J Clin Nutr* 1985;(41):810–817.
15. Khalil SF, Mohktar MS, Ibrahim F. The theory and fundamentals of bioimpedance analysis in clinical status monitoring and diagnosis of diseases. *Sensors* 2014;(4):10895-10928.
16. Avril DH, Lallo C, Mlambo V, Bourne G. The application of bioelectrical impedance analysis in live tropical hair sheep as a predictor of body composition upon slaughter. *Trop Anim Health Prod* 2013;(45):1803-1808.
17. Kyle UG, Bosaeus I, Lorenzo AD, Deurenberg P, Elia M, Gómez JM. Bioelectrical impedance analysis part I: review of principles and methods. *Clin Nutr* 2004;(23):1226–1243.
18. Bera KT. Bioelectrical impedance and the frequency dependent current conduction through biological tissues: A short review. *IOP Conf. Ser.: Mater Sci Eng* 2018;(331).
19. Kumar G, Kasiviswanathan U, Mukherjee S, Mahto SK, Sharma N, Patnaik R. Changes in electrolyte concentrations alter the impedance during ischemia-reperfusion injury in rat brain. *Physiol Meas* 2019;(10):1-22.
20. Guedes DP. Clinical procedures used for analysis of the body composition. *Rev Bras Cineantropometria & Desempenho Hum* 2013;(15):1-17.

21. Cox MK, Heintz R, Hartman K. Measurements of resistance and reactance in fish with the use of bioelectrical impedance analysis: sources of error. *Fish Bull* 2011;(109):34-47.
22. Hartman KJ, Phelan BA, Rosendale JE. Temperature effects on bioelectrical impedance analysis (BIA) used to estimate dry weight as a condition Proxy in Coastal Bluefish. *Mar Coast Fish* 2011;(3):307-316.
23. Barbosa-Silva MCG, Barros AJD, Wang J, Heymsfiel SB, Pierson RN. Bioelectrical impedance analysis: population reference values for phase angle by age and sex. *Am J Clin Nutr* 2005;(82):49-52.
24. Baumgartner RN, Chumlea WC, Roche AF. Bioelectric impedance phase angle and body composition. *Am J Clin Nutr* 1998;(48):16-23.
25. Lukaski HC. Evolution of bioimpedance: a circuitous journey from estimation of physiological function to assessment of body composition and a return to clinical research. *Eur J Clin Nutr* 2013;(67):2-9.
26. Selberg O, Selberg D. Norms and correlates of bioimpedance phase angle in healthy human subjects, hospitalized patients, and patients with liver cirrhosis. *Eur J Appl Physiol* 2002;(86):509-516.
27. Britto EP, Mesquita ET. Bioimpedância elétrica aplicada à insuficiência cardíaca. *Rev SOCERJ* 2008; (21):178-183.
28. Cox MK, Heintz R. Electrical phase angle as a new method to measure fish condition. *Fish Bull* 2009;(107):477-487.
29. Lukaski HC. Methods for the assessment of human body composition: traditional and new. *Am J Clin Nutr* 1987;(46):537-556.
30. Jenkins TG, Leymaster TGKA, Turlington LM. Estimation of fat-free soft tissue in lamb carcasses by use of carcass and resistive impedance measurements. *J Anim Sci* 1988;(66):2174-2179.
31. Berg EP, Marchello MJ. Bioelectrical impedance analysis for the prediction of fat-free mass in lambs and lamb carcasses. *J Anim Sci* 1994;(72):322-329.
32. Moro AB, Galvani DG, Montanholi YR, Bertemes-Filho P, Venturini RS, Martins AA, da Silva LP, Pires CC. Assessing the composition of the soft tissue in lamb carcasses with bioimpedance and accessory measures. *Meat Sci* 2020;(169):1-20.
33. Bertotti FS. Sistema de biotelemetria passiva e técnica de medição para aquisição da impedância elétrica de tecido animal post mortem. [Tese Doutorado]. Brasil, DF: Universidade Tecnológica Federal do Paraná;2010.

34. Damez JL, Clerjon S, Said A, Lepetit J. Dielectric behavior of beef meat in the 1-1500 kHz range: Simulation with Fricke/Cole-Cole model. *Meat Sci* 2007;(77):512–519.
35. Swantek PM, Crenshaw JD, Marchello MJ, Lukaski HC. Bioelectrical impedance: a nondestructive method to determine fat-free mass of live market swine and pork carcasses. *J Anim Sci* 1992;(70):169-177.
36. Gibbs LR, Cadaret CN, Swanson RM, Beede KA, Posont RJ, Schmidt BT. Body composition estimated by bioelectrical impedance analyses is diminished by prenatal stress in neonatal lambs and by heat stress in feedlot wethers. *Transl Anim Sci* 2019;(3):1691–1695.
37. Fukuda O, Hashimoto D, Ahmed I. Bioelectrical impedance analysis for estimating marbling score of live beef cattle in Japan. *IEEE IEEM* 2016;(10):1508-1512.
38. Silva ER, Afonso J, Monteiro JA, Morais R, Cabo RA, Batista AC, Guedes CM, Teixeira A. Application of bioelectrical impedance analysis in prediction of light kid carcass and muscle chemical composition. *Animal* (2017);1-7.
39. Afonso J, Guedes C, Santo V, Morais R, Silva J, Teixeira A, Silva S. Utilization of bioelectrical impedance to predict intramuscular fat and physicochemical traits of the beef *Longissimus thoracis et Lumborum* Muscle. *Foods* 2020;(9):1-11.
40. Hartmann KJ, Margraf FJ, Hafs AW, Cox MK. Bioelectrical impedance analysis: A new tool for assessing fish condition. *Fisheries* 2015;(40):590-600.
41. Wuenschel MJ, McElroy WD, Oliveira K, Richard S, McBride RS. Measuring fish condition: an evaluation of new and old metrics for three species with 2 contrasting life histories. *Can J Fish Aquat Sci* 2018:1-64.
42. Champion C, Hobdayb AJ, Pecla GT, Traceya SR. Maximising the utility of bioelectrical impedance analysis for measuring fish condition requires identifying and controlling for sources of error. *Fish Res* 2020;(229):1-10.
43. Cox MK, Hartman KJ. Non-lethal estimation of proximate composition in fish. *Can J Fish Aquat Sci* 2005;(62):269–275.
44. Zaniboni-Filho E, Hermes-Silva S, Weingartnerb M, Jimenez JE, Borbab MR, Fracalossi DM. Bioimpedance as a tool for evaluating the body composition of suruvi (*Steindachneridion scriptum*). *Braz J Biol* 2015;(75):239-244.
45. Falke JA, Bailey LT, Fraley KM, Lunde MJ, Gryaska AD. Energetic status and bioelectrical impedance modeling of Arctic grayling *Thymallus arcticus* in interior Alaska rivers. *Environ Biol Fish* 2019;(102):1337–1349.

46. Fitzhugh GR, Wuenschel MJ, Mcbrid RS. Evaluation of bioelectrical impedance analysis (BIA) to measure condition and energy allocated to reproduction in marine fishes. *J Phy Conf Ser* 2010;(224):1-4.
47. Moyle PB, Cech JJ. *Fishes an introduction to ichthyology*. 5nd ed. NJ, USA: Prentice Hall, Upper Saddle River; 2004.
48. Zavadlav S, Lackovi'c I, Kovacevic DB, Greiner R, Putnik P, Filipec SV. Utilizing impedance for quality assessment of European squid (*Loligo vulgaris*) during chilled storage. *Foods* 2019;(624):1-12.
49. Garner SB, Boswel KM, Van Der Ham JL, Cowan JH. Use of bioelectric impedance analysis to assess total body condition and predict energy density in juvenile Atlantic croaker. *Trans Am Fish Soc* 2012;(141):1117-1125.
50. Dibble KL, Yard MD, Ward DL, Yackulic CB. Does bioelectrical impedance analysis accurately estimate the physiological condition of threatened and endangered desert fish species? *Trans Am Fish Soc* 2017;(146):888-902.
51. Fan X, Lin X, Wu C, Zhang N, Cheng Q, Qi H, Konno K, Dong X. Estimating freshness of ice storage rainbow trout using bioelectrical impedance analysis. *Food Sci Nutr* 2020;(9):154–163.
52. Yuan P, Miyazaki R, Liang J, Hirasaka K, Tachibana K, Taniyama S. A convenient and nondestructive method using bio-impedance analysis to determine fish freshness during ice storage. *Fish Sci* 2018;(84):1099–1108.
53. Hafs AW, Hartman KJ. Influence of electrode type and location upon bioelectrical impedance analysis measurements of brook trout. *Trans Am Fish Soc* 2011;(140):1290-1297.
54. Felice CJ, Madrid RE, Oliveira JM, Rotger VI, Valentinuzzi ME. Impedance microbiology: quantification of bacterial content in milk by means of capacitance growth curves. *J Microbiol Methods* 1999;(35):37–42.
55. Mabrook MF, Petty MC. Effect of composition on the electrical conductance of milk. *J Food Eng* 2003;(60):321-325.
56. Durante E, Becari W, Lima FAS, Peres HEM. Electrical impedance sensor for real-time detection of bovine milk adulteration. *IEEE Sens J* 2016;(16):861-865.
57. Mucchetti G, Gatti M, Neviani E. Electrical conductivity changes in milk caused by acidification: determining factors. *J Dairy Sci* 1994;(77):940-944.
58. Tozzetti DS, Bataier MBN, Alemida LR. Prevenção, controle e tratamento das mastites bovinas: revisão de literatura. *Rev Cient Eletrônica de Med Vet* 2008;(6):1-7.

59. Veiga EA, Bertemes-Filho P. Bioelectrical impedance analysis of bovine milk fat. *J Phys Conf Ser* 2012;(407):1-5.
60. Bertemes-Filho P, Valicheski R, Pereira RM, Paterno AS. Bioelectrical impedance analysis for bovine milk: preliminary results. *J Phys Conf Ser* 2010;(224):012133.
61. Das S, Sivaramakrishna M, Biswas K, Goswami B. Performance study of a 'constant phase angle based' impedance sensor to detect milk adulteration. *Sensor Actuat A-Phys* 2011;(167):273–278.
62. Santos LF, Coelho KS, Cunha AF, Nunes MF, Falcão JPM. Influência de parâmetros físico químicos do leite na detecção de mastite subclínica bovina por condutividade elétrica. *Rev Cient Univiçosa* 2015;(7):1-6.