

curso de doctorado

ANOMALÍAS EN

VISIÓN DE LOS COLORES

M GUADALUPE DONOSO MORCILLO
CURSO 2003/2004

1. INTRODUCCIÓN

El sistema visual humano está compuesto por el ojo y una porción del cerebro que procesa las señales neurológicas que provienen de este. Juntos, el ojo y el cerebro convierten la información óptica en una percepción de una escena visual. El ojo es la cámara del sistema visual humano. Este convierte la información visual en impulsos nerviosos usados por el cerebro.

El ojo en su conjunto, llamado globo ocular, es una estructura casi esférica de aproximadamente 22mm de diámetro. Está rodeado por tres membranas: la córnea y la esclerótica, que constituyen la cubierta exterior, la coroides y la retina. Los rayos de luz generados o reflejados por un objeto primero golpean el ojo en la córnea. La córnea actúa como una lente convexa, refractando los rayos. Esta refracción forma el enfoque inicial de la luz que entra al ojo. La córnea forma una protección transparente que cubre la superficie anterior del ojo. Después de la córnea, los rayos pasan a través de un líquido claro y húmedo llamado el humor acuoso, y después pasan a través del iris y el cristalino. El iris actúa como una apertura variable que controla la cantidad de luz que puede pasar a través del cristalino. El iris es controlado por músculos que lo abren y lo cierran basados en la intensidad promedio del objeto que es observado. En la noche el iris se abre ampliamente, mientras que en un día luminoso se cierra bastante.

El cristalino lleva a cabo el segundo enfoque de la luz, proyectando a esta en la retina. El cristalino es controlado por músculos, los cuales permiten variar la distancia focal del sistema óptico total dependiendo de la distancia del objeto observado. Tal como una cámara, el ojo debe ser enfocado basado en qué tan lejos está este del objeto. Los rayos de luz salen del cristalino pasando a través de una sustancia transparente y gelatinosa, llamada humor vítreo, y son finalmente enfocados en la retina. El humor vítreo mantiene la estructura del ojo mientras que ópticamente une el cristalino a la retina. Véase la Figura 1.

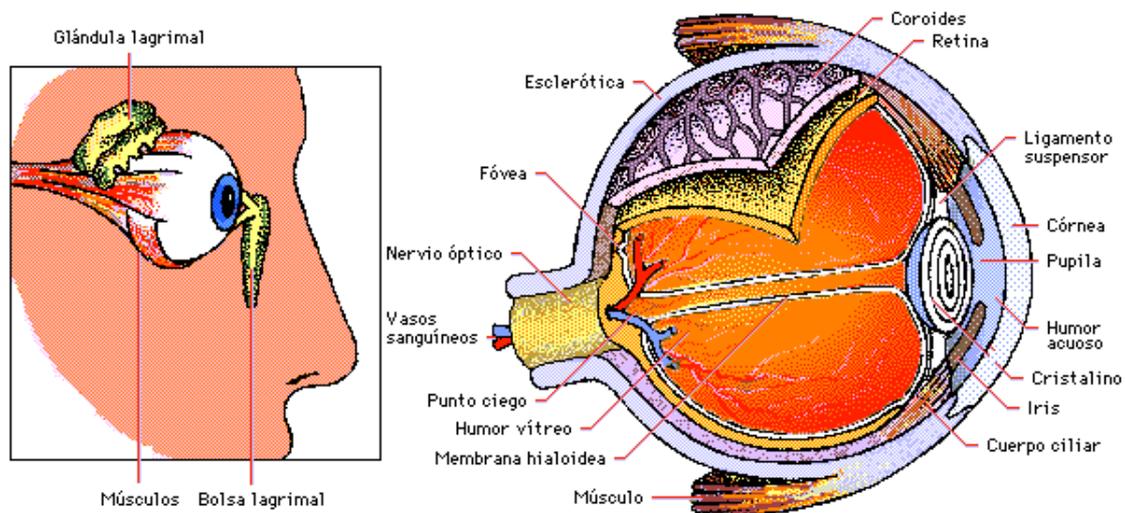


Figura 1 Diagrama del ojo humano

La membrana más interna del ojo es la retina, que cubre la totalidad de la pared posterior. Cuando el ojo está correctamente enfocado, la luz de un objeto exterior al ojo forma su imagen en la retina. La retina está compuesta por fotorreceptores que convierten la intensidad y el color de la luz en señales nerviosas. Existen dos tipos de fotorreceptores:

- Los **bastones** son los más abundantes: entre 75 y 150 millones están distribuidos sobre la superficie retiniana y son los que más responden a la luz. Su gran área de distribución, junto con el hecho de que grupos de varios bastones comparten una misma terminación nerviosa, reduce la cantidad de detalle discernible por estos receptores. Los bastones sirven para dar una visión general del campo de visión, no están implicados en la visión del color y son sensibles a niveles de iluminación bajos, como en la noche.
- Los **conos** son mucho menos abundantes que los bastones (alrededor de 6 a 7 millones) y están localizados principalmente en la región central de la retina, denominada fovea. Los conos son muy sensibles al color y son algo menos sensitivos a la luz. Son usados para la visión de luz brillante, tal como en un día soleado. Los seres humanos pueden apreciar detalles relativamente finos gracias a esos conos porque cada uno está conectado a su propia terminación nerviosa. Los músculos que controlan el ojo giran el globo ocular hasta que la imagen del objeto visto queda en la fovea. Existen tres diferentes tipos de conos denominados S, M, L, cada uno responde a una banda distinta del espectro de la luz, azul, verde, rojo respectivamente. Básicamente, cada cono responde de forma diferente a un color arbitrario, así genera un conjunto único de respuestas para cada color de la luz. Con estas señales de los tres tipos de conos, el cerebro tiene la información con la cual forma una percepción distinta de un gran número de colores diferentes.

Las diferencias entre bastones y conos, y sus distribuciones a través de la retina, son responsables de diversos aspectos de la visión. Ya que los conos que perciben el color están concentrados en la fovea, la percepción del color es mejor para los objetos que se ven directamente al frente. Recíprocamente, se tiene una mínima percepción del color para objetos en la visión periférica. Ya que los bastones altamente sensitivos son abundantes por todas partes menos en la fovea, la percepción de luz de bajo nivel es mejor en la visión periférica. Así, durante la noche, los objetos confusos se pueden ver por la parte periférica de la retina cuando son invisibles para la fovea. La relativa insensibilidad de los conos cuenta además para la incapacidad de percibir el color bajo condiciones de poca luz, tal como en la noche.

Como la luz incide los bastones y los conos causa una reacción electroquímica que genera impulsos nerviosos. Estos impulsos se pasan al cerebro por el nervio óptico. El nervio óptico es una extensión de la retina que lo conecta al cerebro. Un pequeño punto ciego se crea en la retina donde el nervio óptico se une. Los impulsos neuronales son recibidos por el cerebro y procesados por la corteza visual. La percepción de la visión se crea dentro del proceso de la corteza visual.

El ojo no es uniformemente sensible a todo el espectro visible. La Figura 2 muestra la respuesta relativa del "ojo medio u ojo patrón" a una luz de luminancia constante proyectada en las varias longitudes de onda comprendidas en el espectro. El pico (máximo) de la curva está en la región verde-amarillo y es interesante observar que una curva que represente la distribución de energía de luz solar o natural tiene su máximo en esta área. La

curva de línea gruesa representa la impresión subjetiva de brillo del observador medio en condiciones de luz natural. Como muestra la segunda curva, en condiciones cercanas a la oscuridad la curva de respuesta se desplaza hacia la izquierda.

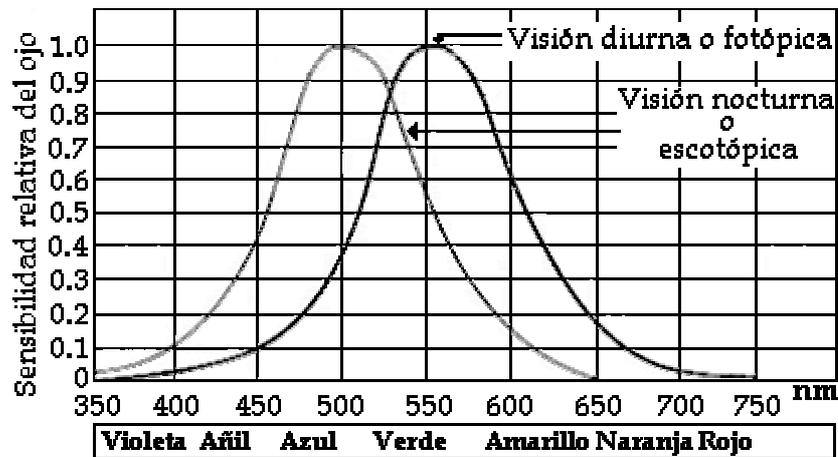


Figura 2 Sensibilidad relativa del ojo humano a diferentes longitudes de onda

Se dice que una luz de una sola longitud de onda es monocromática. Por nuestra aptitud para distinguir una variedad de diferentes colores se puede suponer que existen diferentes tipos de conos en la retina, y que cada tipo está "sintonizado" a una pequeña banda de frecuencia. Si los conos fuesen monocromáticos de esta manera, entonces la impresión de un color dado podría ser únicamente producido por la energía electromagnética que tuviese la longitud de onda apropiada. Sin embargo, esto no es cierto, la luz monocromática brillante que impresiona a la retina no es la única manera de crear una impresión de color dada. Por ejemplo, algunos amarillos monocromáticos pueden ser adaptados por la llegada simultánea a la retina de luz roja y verde.

El comportamiento del ojo es consistente con los tres tipos de conos únicamente, teniendo cada uno una curva diferente de respuesta. Las tres curvas de respuesta se solapan de manera que todos los colores están debajo de cualquier curva de ellas, o bien parcialmente debajo de dos, o de las tres curvas, tal y como se muestra en la Figura 3. Se observará que el amarillo activa a los conos verde y rojo. Lo lógico es deducir que cuando la luz verde y la luz roja llegan a la retina al mismo tiempo, la excitación simultánea de los conos correspondiente al verde y al rojo produce en el centro sensorial del cerebro una impresión que es indistinguible de la del amarillo monocromático.

Para que se pueda ver el color, tiene que llegar al ojo la energía electromagnética. Se ve un objeto por la luz reflejada desde él. Si parece verde a la luz del día, entonces esto debe implicar que aunque está bañado de luz natural "blanca", es solamente la reflexión de la parte verde de la luz la que llega a los ojos y el resto del espectro es "absorbido". Por lo tanto, un objeto parece coloreado a causa de que sólo refleja parte del espectro visible y absorbe el resto. El color procede de la luz incidente, así por ejemplo, la hierba no parece verde bajo iluminación de sodio a causa de que en ella no hay luz verde que pueda ser reflejada.

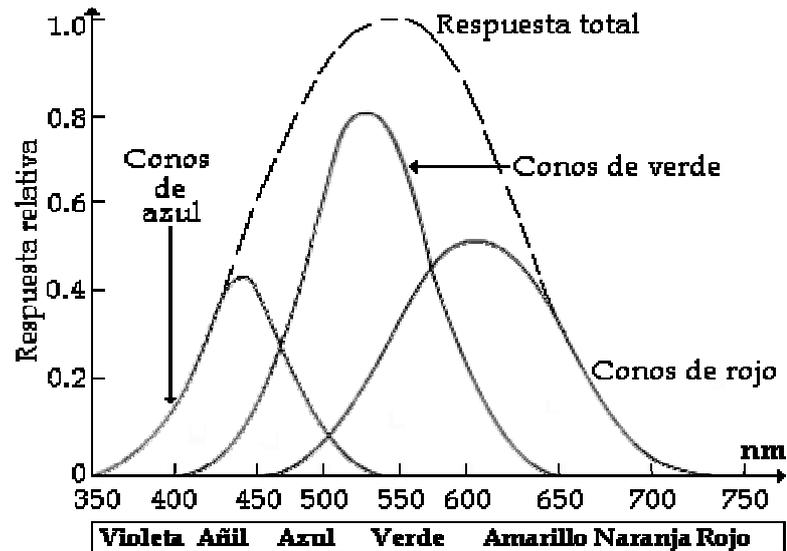


Figura 3 Sensibilidades de los tres tipos de conos en la retina

2. ANOMALÍAS DE LA VISIÓN DE LOS COLORES

Los colores se pueden obtener haciendo una mezcla de los tres colores primarios, rojo, verde y azul, esta mezcla se denomina aditiva o bien realizando una mezcla de los tres colores tinta, también llamados complementarios o secundarios, amarillo, magenta y cian, a esta mezcla se le denomina sustractiva. En la Figura 4 se puede observar la mezcla aditiva y la mezcla sustractiva de colores.

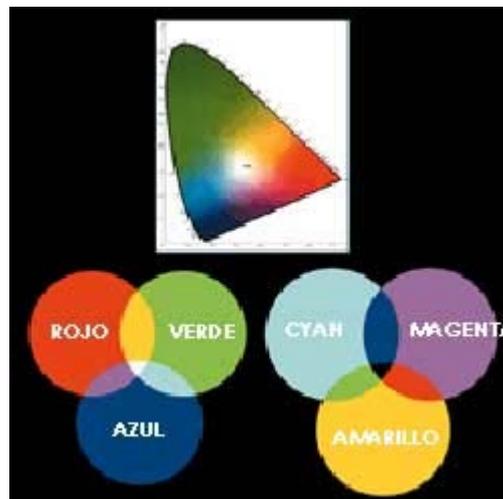


Figura 4 Mezcla aditiva y mezcla sustractiva de colores.

El ojo humano es capaz de obtener por igualación de mezcla aditiva de colores primarios cualquier color. Sin embargo no todos los observadores perciben de igual forma el color obtenido, de tal forma que la discriminación entre unos y otros puede variar sustancialmente de aquellos parámetros que se establecen en la definición de observador patrón.

Un observador normal es capaz de obtener cualquier color por igualación mediante la mezcla de colores primarios. A este tipo de observadores se les denomina “**tricrómatas**”. Tal y como hemos visto en la figura 3 la sensibilidad de los conos que discriminan el rojo, el verde y el azul se solapan lo que significa una pérdida en el uso de un número determinado de conos como consecuencia del cambio en el espectro de color percibido, tal y como se ve en la figura 4.

En la figura 5 se muestra como sería la visión de un tricrómata u observador normal a través de un diagrama de círculos concéntricos en los cuales se distinguen tres regiones una primera donde se observan colores más pálidos que van aumentando su color a medida que nos dirigimos hacia la tercera región de círculos concéntricos.

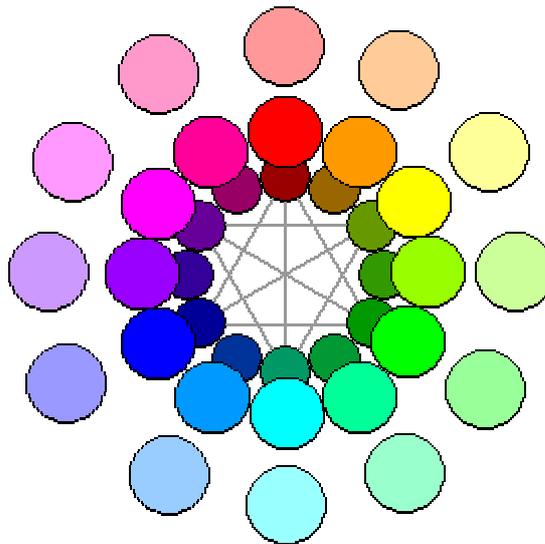


Figura 5 Diagrama de la visión de un observador normal o tricromático

Sin embargo existen observadores que no son capaces de discriminar colores que serían fácilmente diferenciables por un observador normal. Así podemos decir que si el observador es capaz de igualar todos los colores como mezcla de dos de los colores primarios estaríamos en el caso de un observador “**dicrómata**”, existiendo varios tipos en función de la incapacidad o la limitada capacidad para el uso de alguno de los tres tipos de conos, *protanes*, *deutanes* y *tritanopes*. Y si el observador es capaz únicamente de realizar la igualación del color a través de un único color en una proporción adecuada, se podría decir que su percepción de colores se limita a una escala de grises.

Vamos a centrarnos en el estudio de los dicromatas, en concreto nos centraremos en aquellos con deficiencia en rojo-verde y en azul-amarillo, de esta forma se define:

- **Protanopía:** Es el término usado para definir al individuo que posee una falta de sensibilidad al color rojo. Esta condición surge como consecuencia de la pérdida de actividad de los conos tipo L, los cuales son sensibles a la porción roja del espectro visible. Aquellos que poseen esta anomalía poseen una débil percepción de color rojo, de tal forma que la falta de esta componente en colores tales como el rojo, el naranja, el amarillo verdoso y el verde está debilitada y por tanto estos colores aparecen más pálidos de lo que un observador normal los percibiría. También poseen dificultades en la percepción de colores tales como el violeta y el lavanda ya que únicamente se percibiría la componente azul siendo indistinguible del color

azul puro. En la figura 6 se muestra de igual forma que se hizo con un observador tricromata el diagrama de la visión de un protán a través de un conjunto de círculos concéntricos de distintos colores.

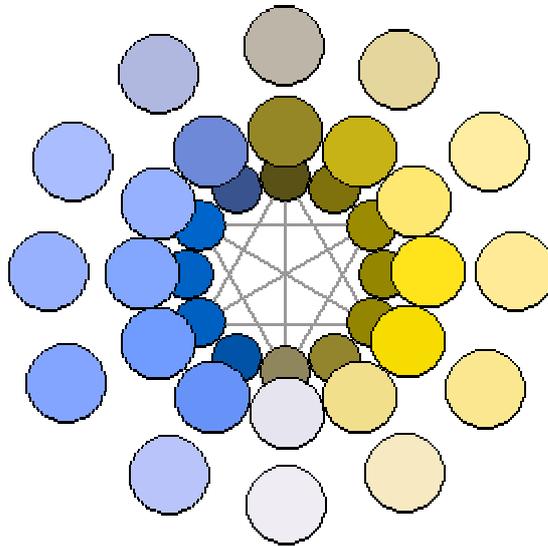


Figura 6 Diagrama de la visión de un observador protanope

- **Deuteranopía:** Este término se emplea cuando el observador carece de sensibilidad al color verde. Esto surge como consecuencia de la pérdida de sensibilidad de los conos de tipo M, los cuales son sensibles a la porción de verde existente en el espectro visible. Presentan problemas análogos a los mostrados por los protanopes a la hora de distinguir matices en los colores pero sin un oscurecimiento anómalo de los mismos, así como para nombrar e identificar colores. Por ejemplo los colores rojo, naranja y verde se muestran muy similares al igual que el violeta, el púrpura, el lavanda y el azul. En la figura 7 se muestra como sería la visión de un observador deuteranope.

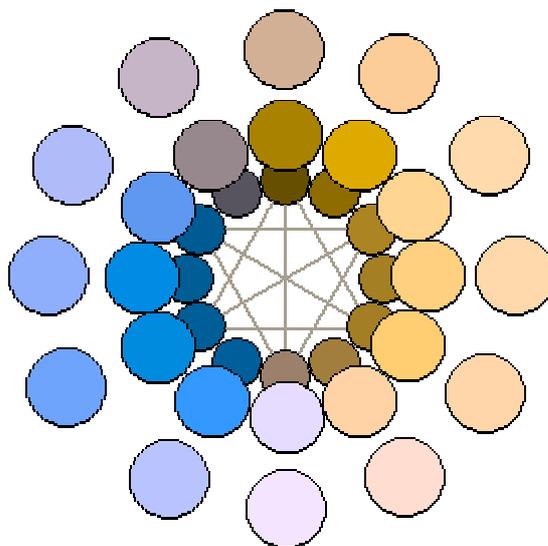


Figura 7 Diagrama de la visión de un observador deuteranope.

- **Tritanopía:** Aunque los humanos poseen los tres tipos de conos, para un observador normal la mayor parte de la información viene dada por la intervención de los conos receptores para el verde y el rojo a la hora de distinguir e identificar colores. La contribución de los conos receptores al color azul es relativamente baja ya que son únicamente un 10% del total de los conos existentes. Sin embargo, por encontrarse el azul en el lado opuesto en el espectro al color rojo, su pérdida ocasiona problemas importantes de sensibilidad a lo largo de todo el espectro. Esto se debe a que la sensibilidad de los conos de tipo S tiene muy poco solapamiento con las curvas de sensibilidad de los conos L y M, tal y como se muestra en la figura 3. Esta deficiencia sucede cuando falta un gen en el cromosoma X y en la retina parece existir una falta de conos receptores al azul. Las personas con este tipo de desorden perciben el mundo con distintos matices de rojo o de un color verde/turquesa. En la figura 8 se muestra el diagrama de visión de un observador tritanope.

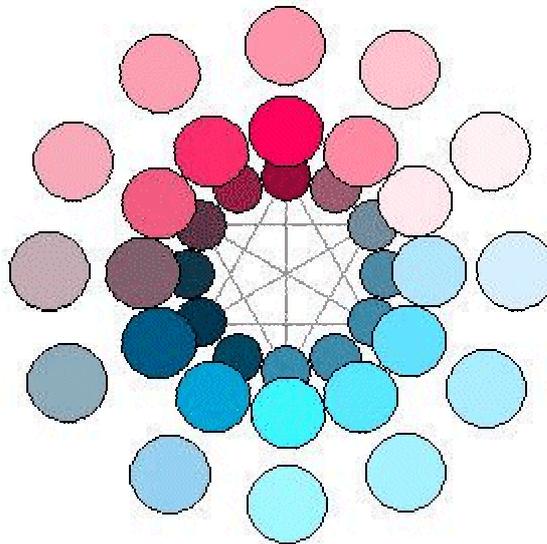


Figura 8 Diagrama de la visión de un observador tritanope

Las causas de estas deficiencias pueden ser o bien congénitas o bien adquiridas, en resumen:

- ✓ **deficiencias congénitas:** el estudio de las anomalías rojo-verde está ligado al sexo, en particular al cromosoma X, siendo el gen recesivo, esto significa que una mujer sólo será defectiva cuando ambos cromosomas, XX, posean dicho gen, en cambio un hombre basta con que el cromosoma X sea defectivo para desarrollarlo. Este modelo inicial es ahora rechazado ya que no explicaba el hecho de que madres normales tenían hijos varones con deficiencias protán y deután.

El nuevo modelo propuesto por Piantanida (1974) plantea que las deficiencias de tipo protán y de tipo deután se enmarcan en distintos *loci* del cromosoma X, concretamente en uno de estos *loci* está el gen responsable de la generación del fotopigmento de los conos L y en otro de los conos M.

Aún queda la duda sobre el deficiente azul-amarillo, así Nathans, analizando el ADN encontró tres porciones que pertenecían a tres genes distintos similares al gen de la rodopsina (fotorreceptor de los bastones). Dos de ellos estaban en el cromosoma X y el tercero en el cromosoma 7 y se le atribuye la fabricación del ftopigmento del cono S.

- ✓ **deficiencias adquiridas**, distinguiendo entre:
 - ❑ *enfermedades no infecciosas*: esclerosis múltiple, neuritis ópticas,..
 - ❑ *enfermedades infecciosas*: enfermedades sifilíticas.

3. PRUEBAS DE DETECCIÓN DE LAS DISTINTAS ANOMALÍAS

Para la determinación y detección de las distintas anomalías que hemos descrito con anterioridad, se usan una serie de pruebas; estas pruebas se pueden dividir en cuatro grandes grupos:

- a) **pruebas pseudoisocromáticas**: son pruebas que se basa en la utilización de láminas compuestas de pequeñas superficies coloreadas (fondo) de las que destacan unas zonas también coloreadas que forman una figura que será sólo visible para observadores normales en unas ocasiones y en otras sólo será visible para observadores anómalos o defectivos.

- *El test de Ishihara*: Consiste en enseñar unas láminas con números o caminos (estos últimos para niños que no saben leer). Los sujetos con defectos de la visión cromática no ven los números o caminos o de forma correcta viendo otros diferentes a los que verían las personas con visión cromática normal En la figura 8 se muestra a modo de ejemplo un de las láminas que posee este test.

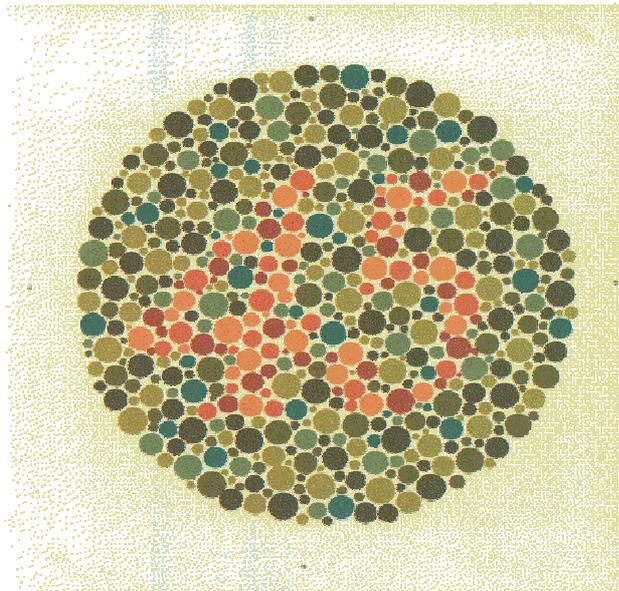


Figura 8 Lámina del test de Ishihara.

b) **pruebas de ordenación:** consiste en la clasificación secuencial de sus elementos constituyentes en función de su tono o saturación.

➤ *Test Farnsworth D-15:* Consiste en la ordenación secuencial de 15 fichas en función de su tono o saturación, desde colores azulados hasta rojizos. En las figuras 9 y 10 se muestran este test y como sería ordenado por los diferentes observadores respectivamente.



Figura 9 Test Farnsworth D-15

Según el tipo de ordenación que realice el observador y teniendo en cuenta la corrección de este test que se muestra en la Figura 10 se concluye que tipo de anomalía presenta el observador.

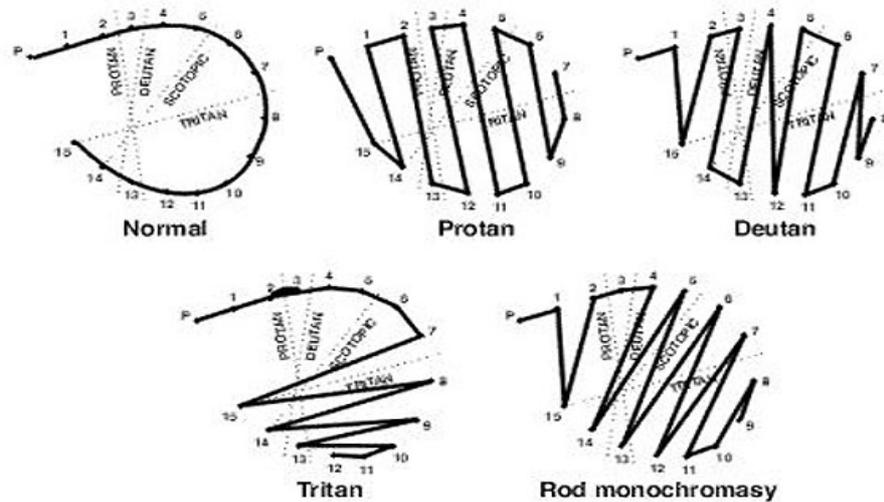


Figura 10 Ordenación de las diferentes fichas de acuerdo con el tipo de observador

c) **Anomaloscopios:** Es esencialmente un colorímetro que produce un par metámero a partir de la mezcla de dos colores espectrales puros de proporciones variables para igualar otro de referencia sobre un campo bipartito. En la figura 11 se muestra un anomaloscopio, de tal forma que el empleo de las proporciones adecuadas de luz de 535 nm ("verde-amarillento") con luz de 670 nm ("rojo-amarillento") puede hacer que la experiencia producida por la mitad de mezcla sea idéntica a la de referencia.

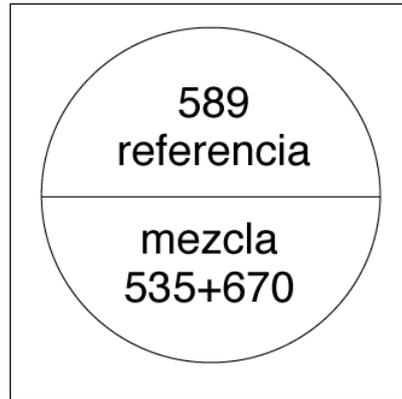


Figura 11 Representación de un anomaloscopio

- d) **Pruebas Profesionales:** son test que sólo determinan la validez de observadores capaces de cumplir satisfactoriamente su contenido profesional.

4. *BÚSQUEDA DE COLORES CONFUNDIBLES POR OBSERVADORES ANÓMALOS*

Para finalizar, una vez que han sido descritas las anomalías que puede presentar un observador en relación a la visión del color, sus causas y las posibles pruebas que existen para su detección; se realiza una serie de medidas simulando como verían distintos colores un individuo que fuera protanope, otro que fuera deuteranope y uno que fuera tritanope. Para ello se utiliza como programa de simulación el **VischeckPS 1.01** y el programa **Descubriendo los colores**. El funcionamiento del programa es bastante sencillo, se parte de un color que hay que igualar, para comprobarlo el programa devuelve una serie de parámetros correspondientes a la “cantidad” de color rojo, verde o azul empleada.

Los resultados obtenidos se presentan en las tablas 1, 2 y 3 en donde se denomina valor original al color de partida e igualado al color que, si bien un observador normal vería diferente al color de partida, un observador con deficiencias en la visión del color ve iguales.

DEUTERANOPE

	igualado original		igualado original		igualado original		igualado original	
rojo	139	128	95	0	111	43	255	231
verde	57	64	97	128	88	85	179	188
azul	0	0	58	64	202	222	125	118

Tabla 1 Valores de las cantidades necesarias para realizar la igualación de color a uno de referencia para un observador deuteranope.

PROTERANOPE

	igualado	original	igualado	original	igualado	original	igualado	original
rojo	134	128	214	137	159	0	101	43
verde	61	64	66	50	109	128	88	85
azul	0	0	179	179	58	64	202	222

Tabla 2 Valores de las cantidades necesarias para realizar la igualación de color a uno de referencia para un observador protanope.

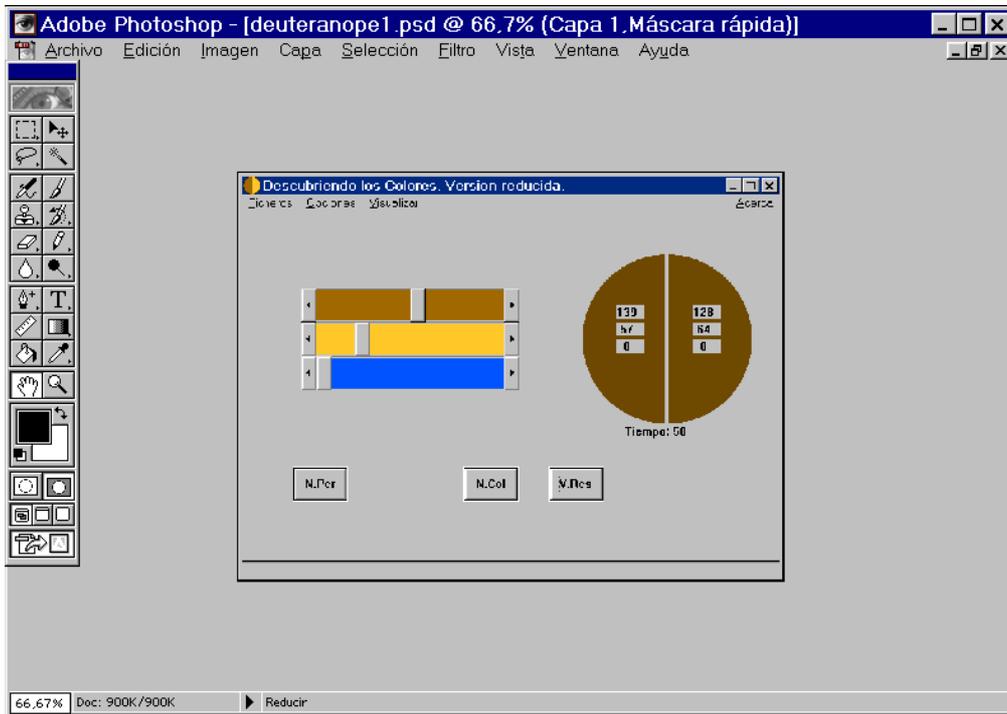
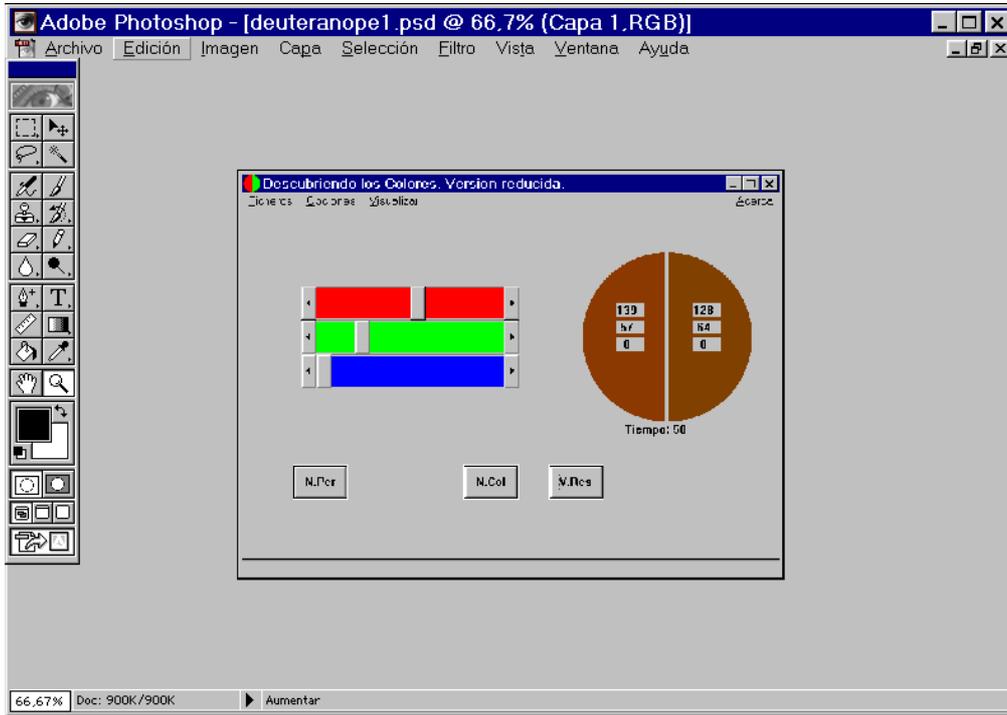
TRITANOPE

	igualado	original	igualado	original	igualado	original	igualado	original
rojo	140	128	173	211	0	0	81	43
verde	53	64	167	150	135	128	95	85
azul	79	0	93	190	54	64	205	222

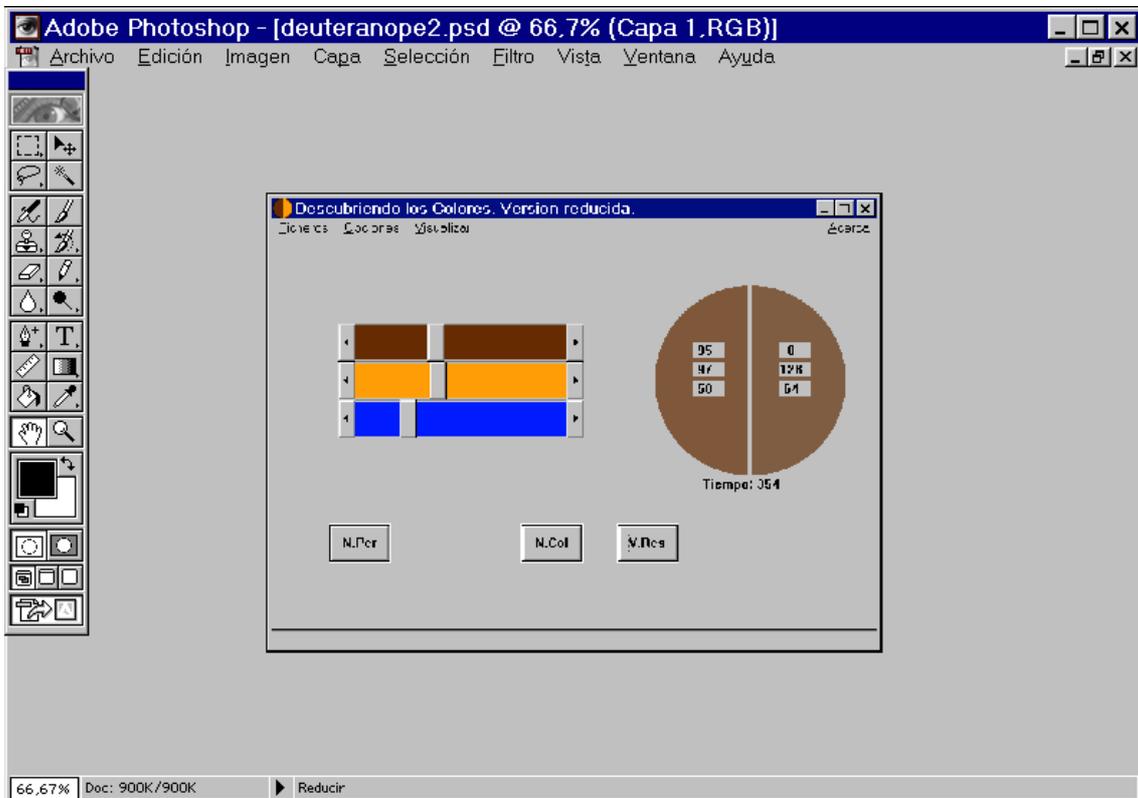
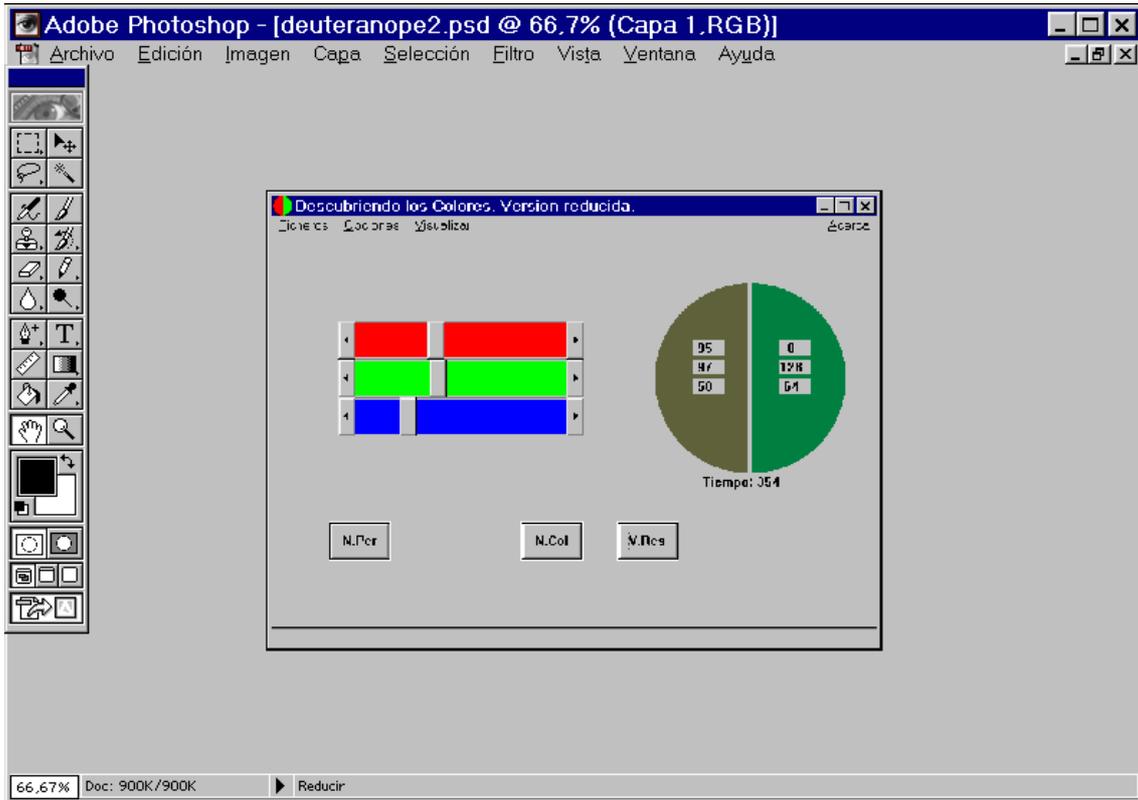
Tabla 3 Valores de las cantidades necesarias para realizar la igualación de color a uno de referencia para un observador tritanope.

Las imágenes correspondientes a cada uno de los valores presentados en las tablas 1, 2, 3 se exponen a continuación por parejas, esto una de las imágenes corresponde a lo observado por un observador sin deficiencias y otra de las imágenes es la observada por un observador deuteranope, ésta última proviene, como ya se ha mencionado, de la utilización del programa de simulación VischeckPS 1.01. En todos los casos la primera imagen corresponde al dibujo sin aplicarle la simulación, es decir, a la visión de un observador normal; la segunda imagen corresponde al dibujo después de aplicarle la simulación, esto es visión de un observador deuteranope, protanope o tritanope en cada caso.

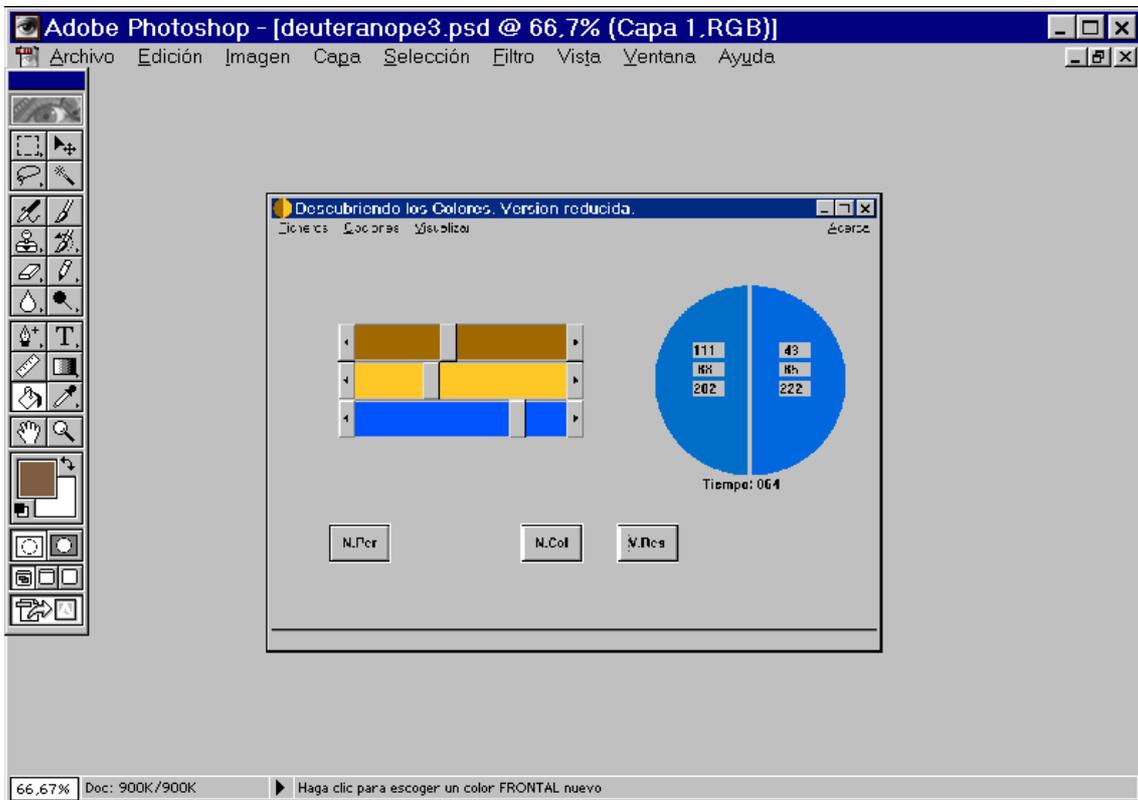
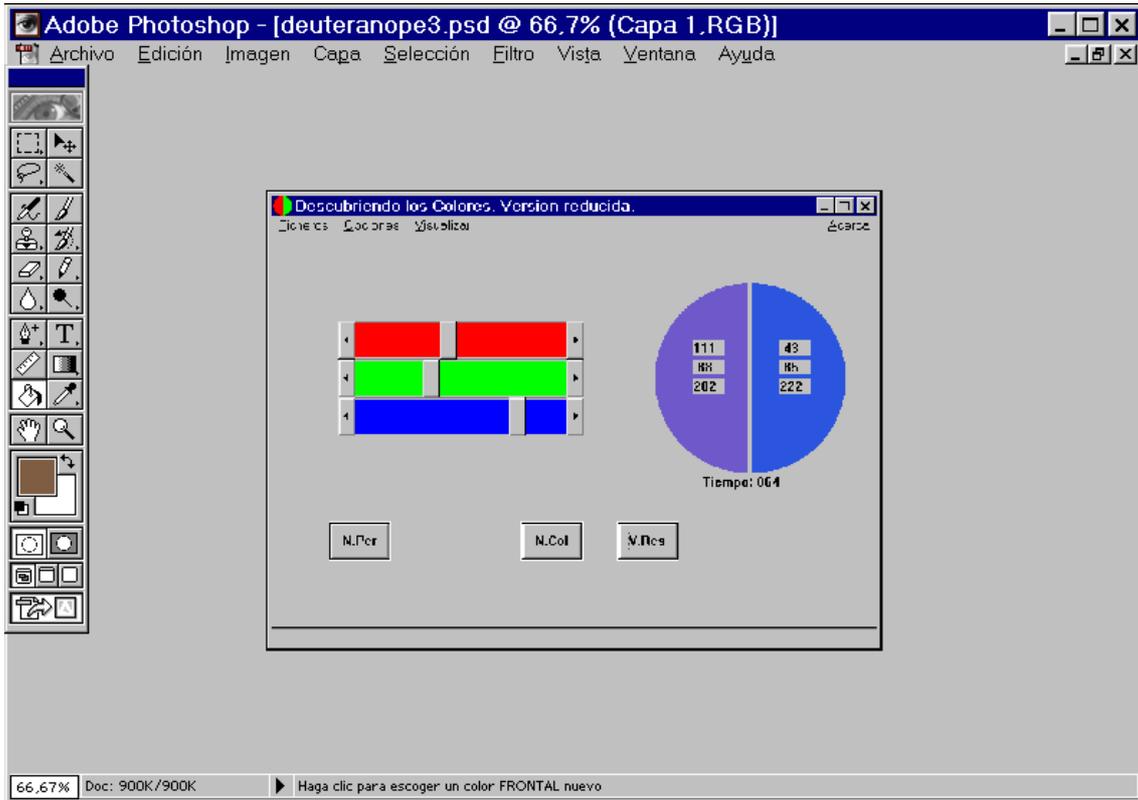
- DEUTERANOPE 1



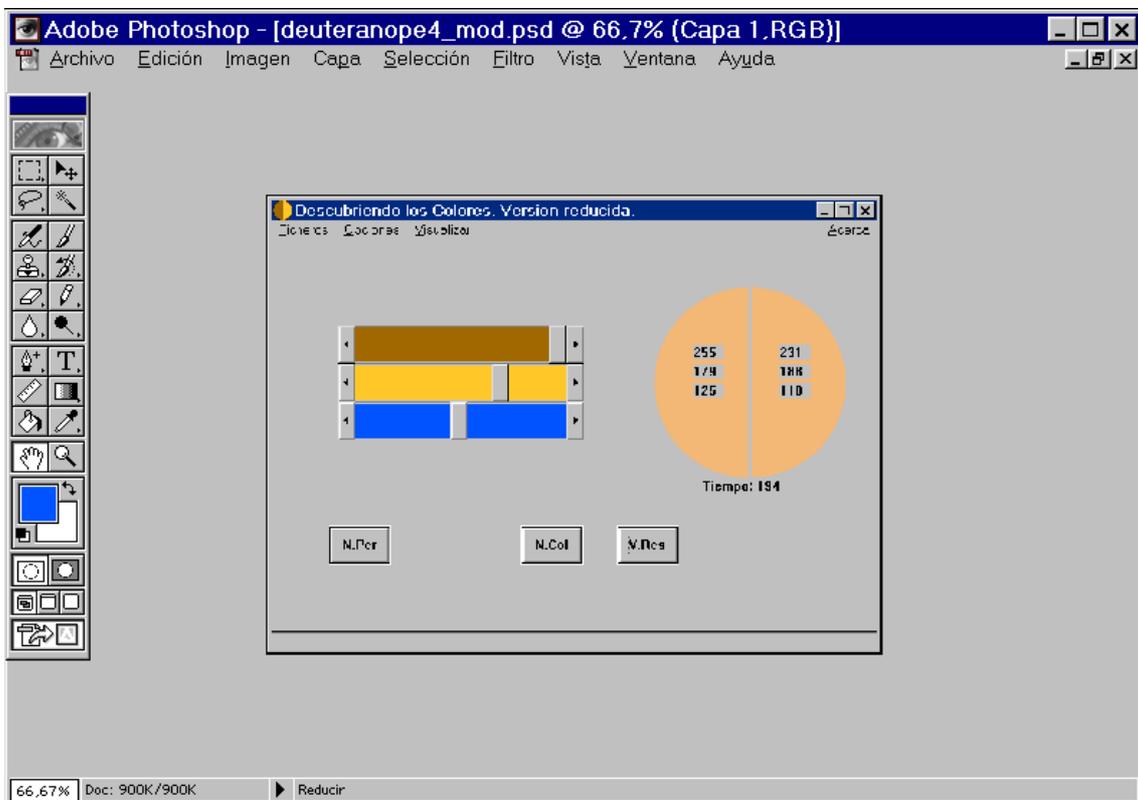
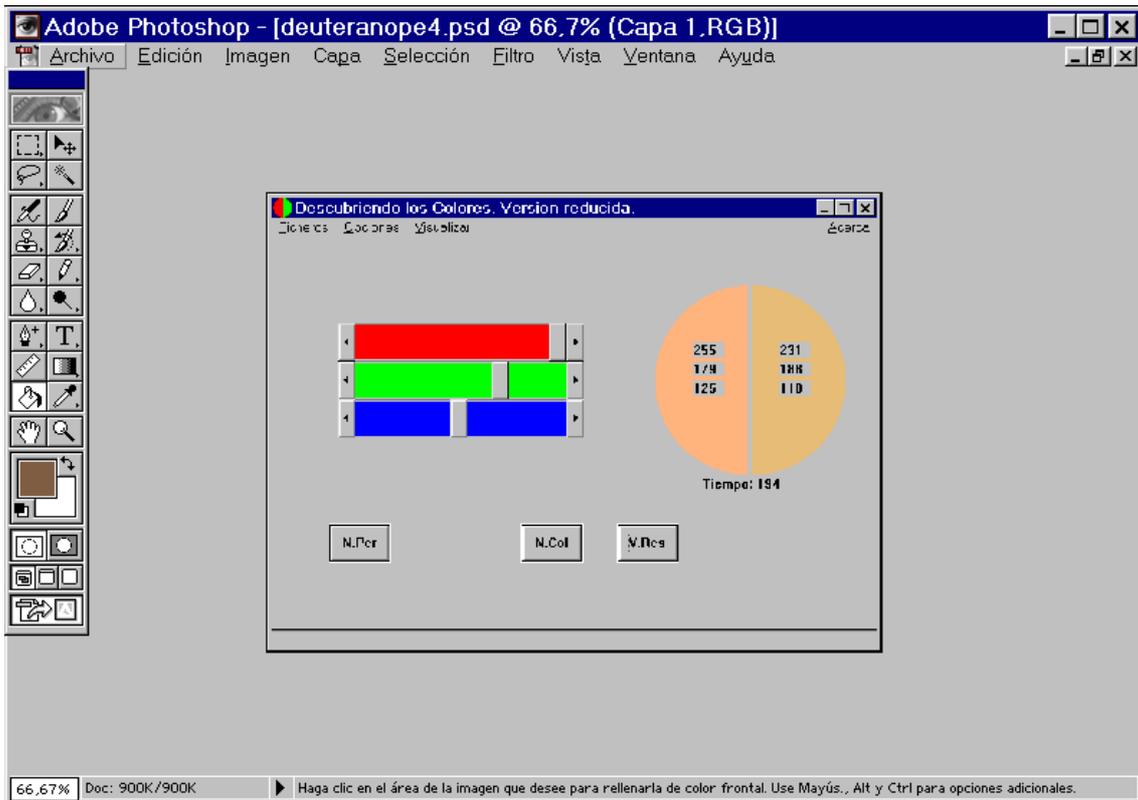
- DEUTERANOPE 2



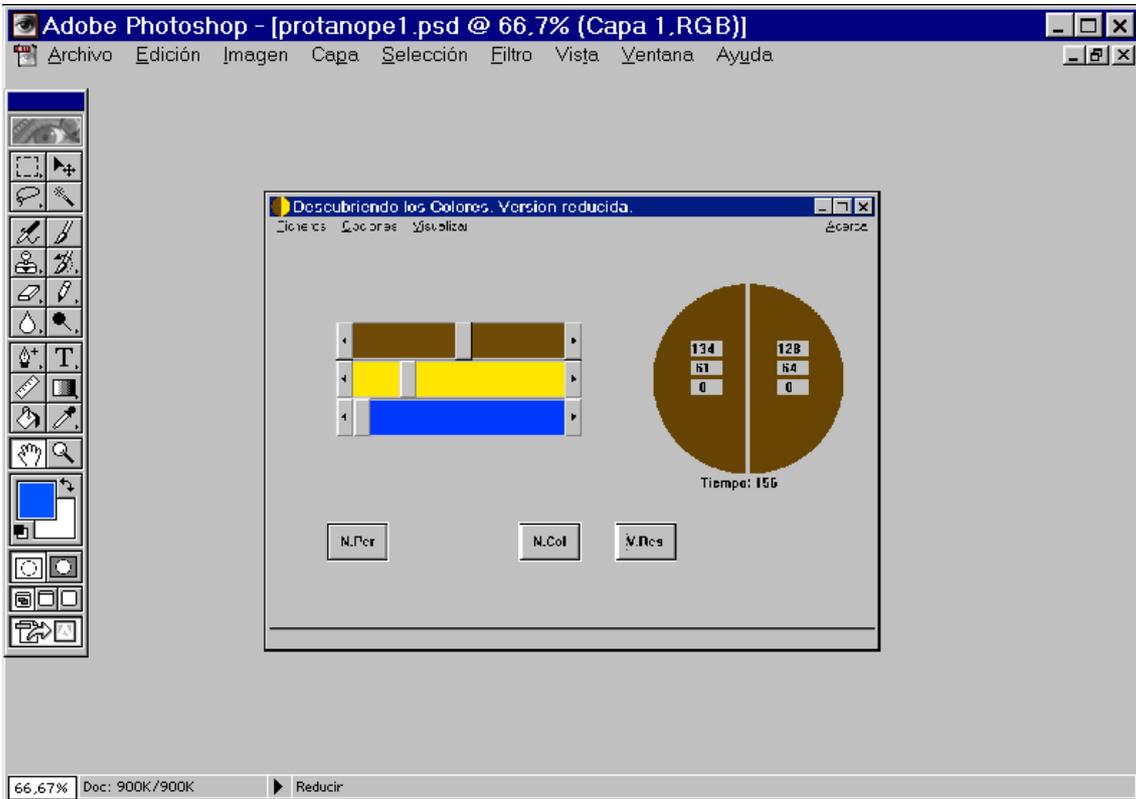
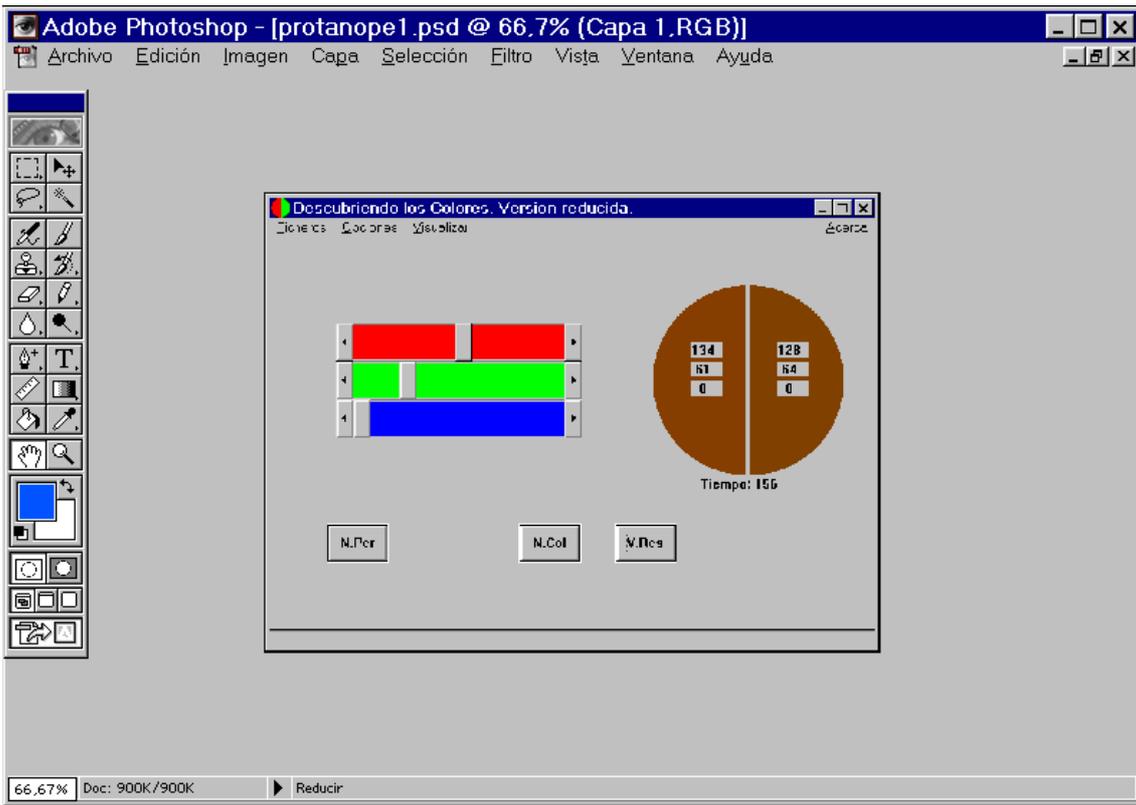
- DEUTERANOPE 3



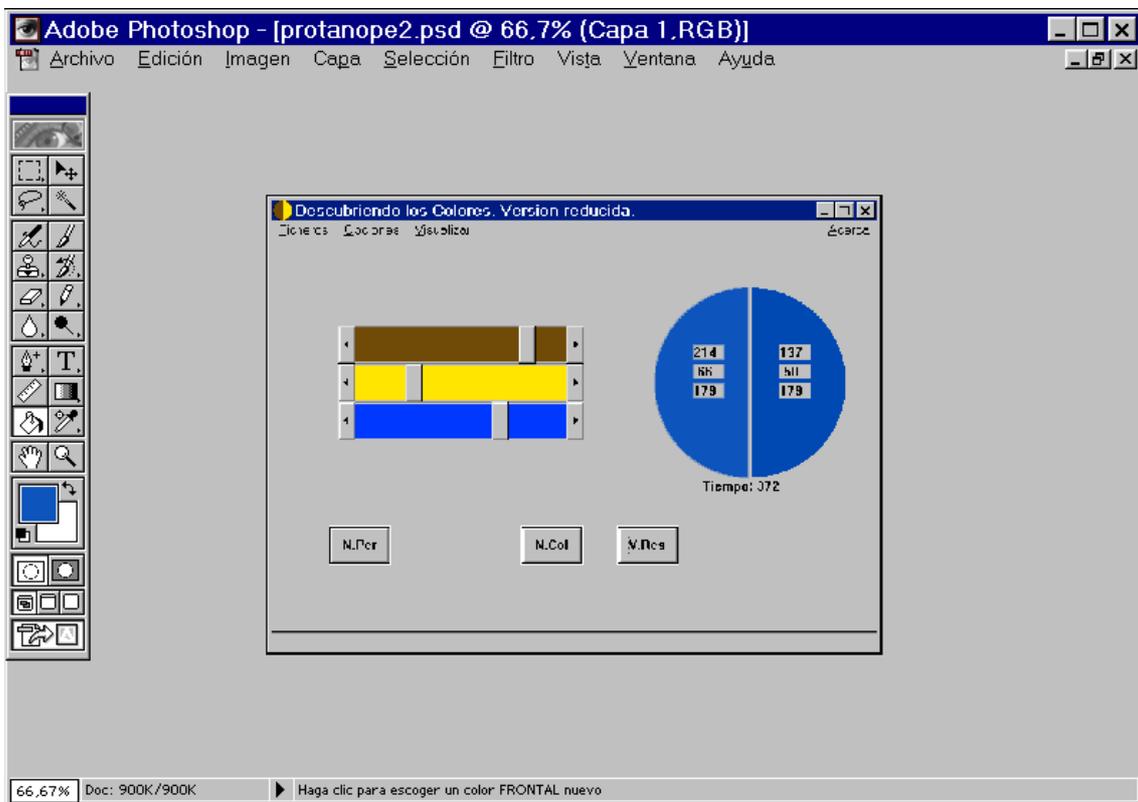
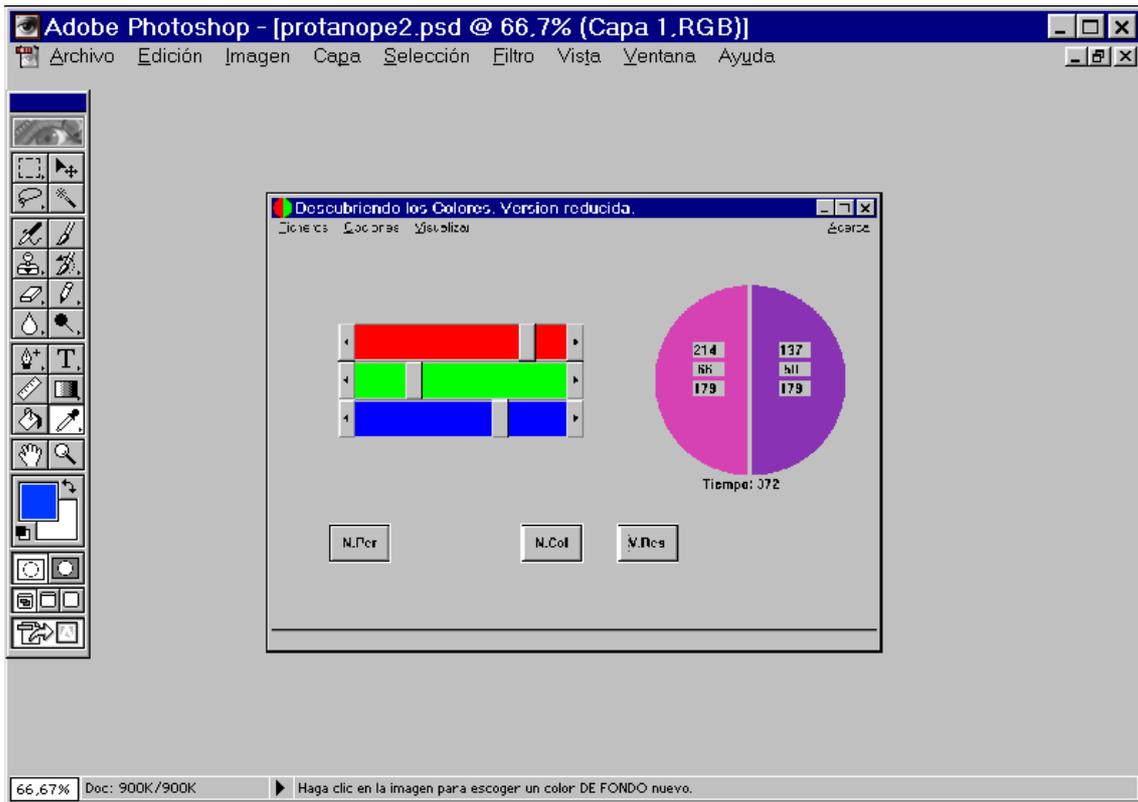
- DEUTERANOPE 4



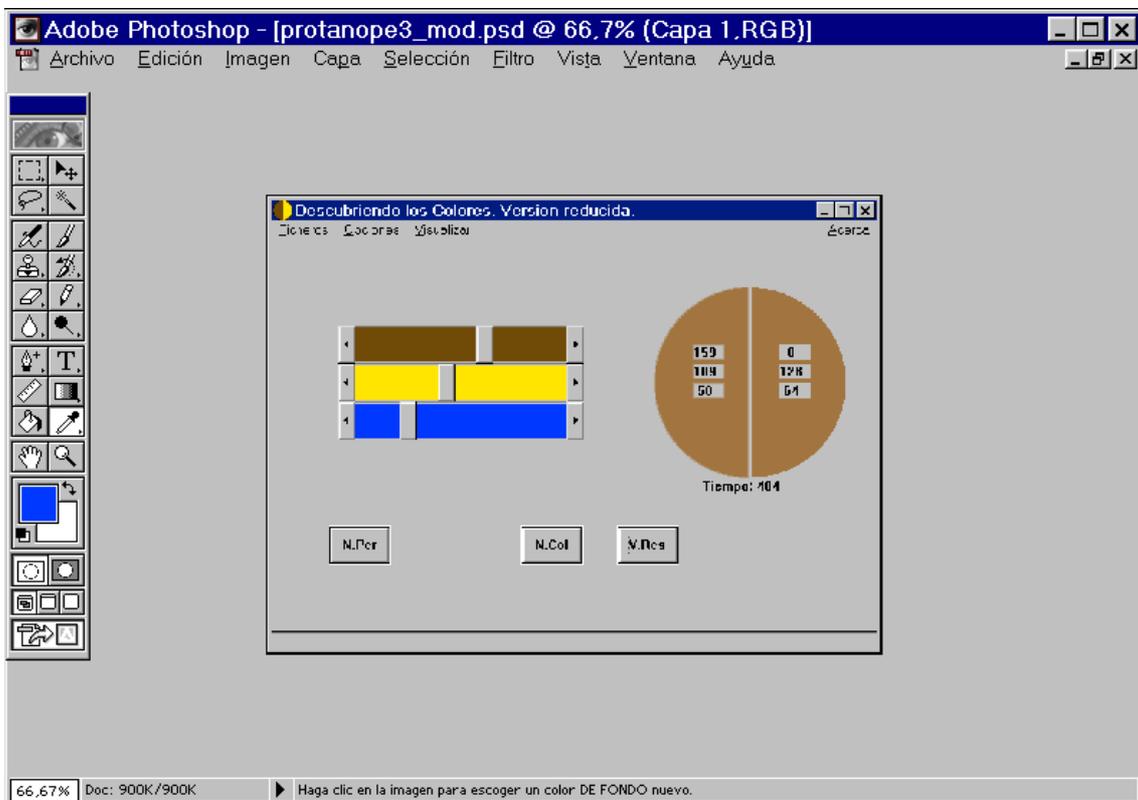
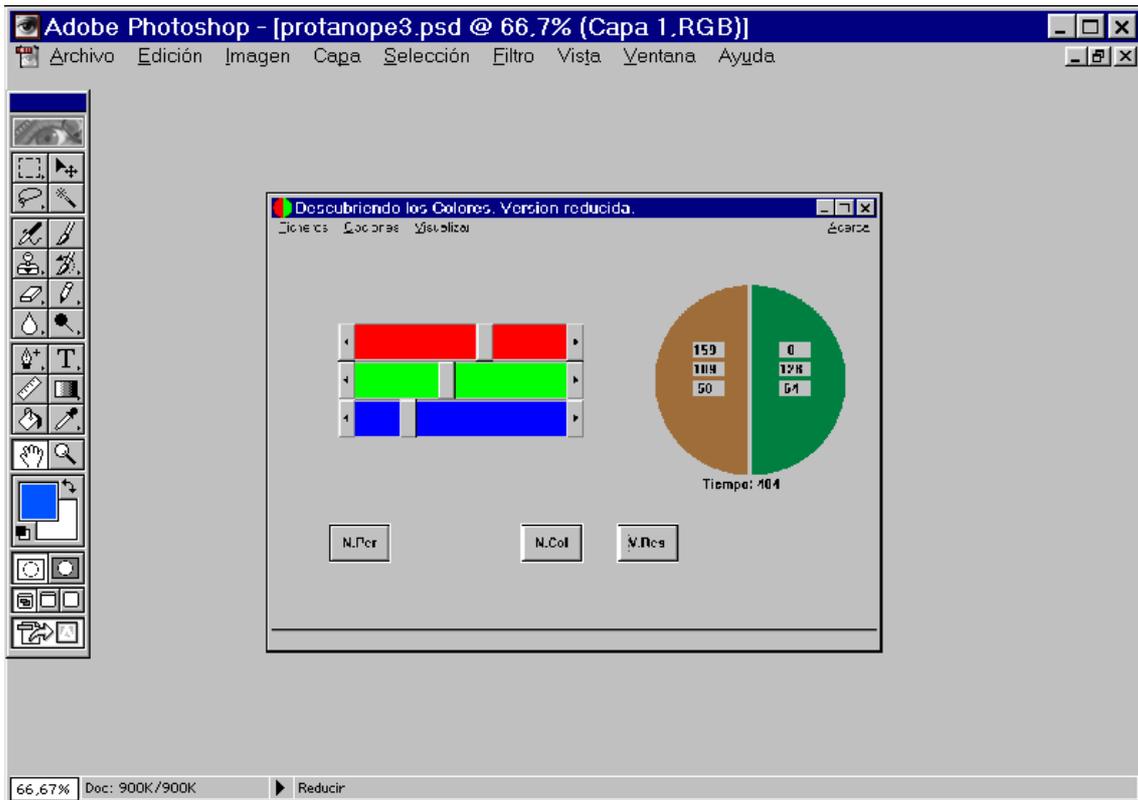
- PROTERANOPE 1



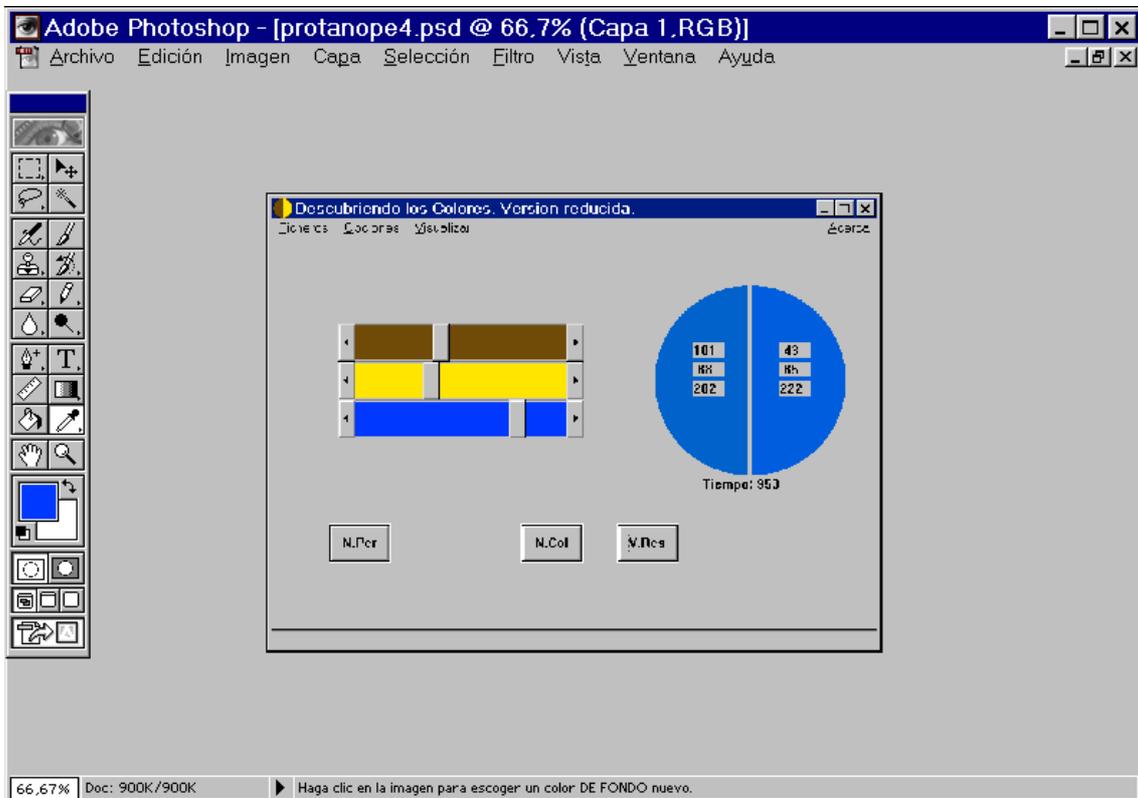
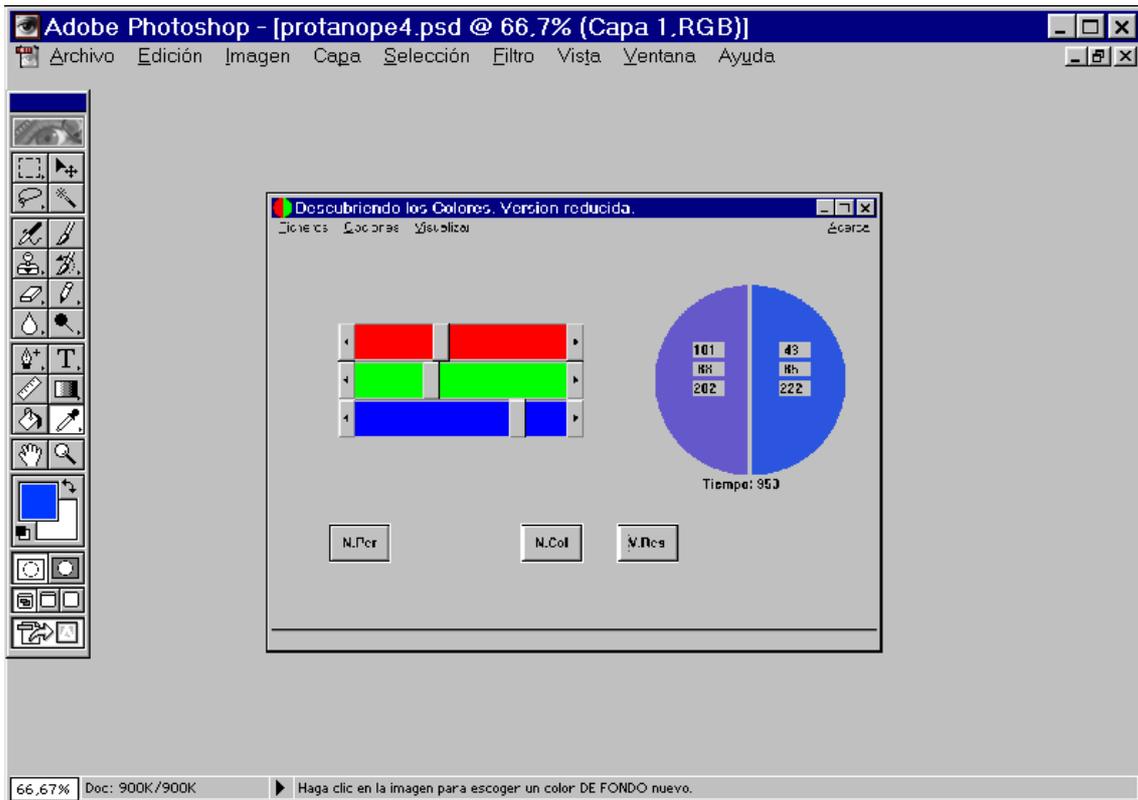
- PROTERANOPE 2



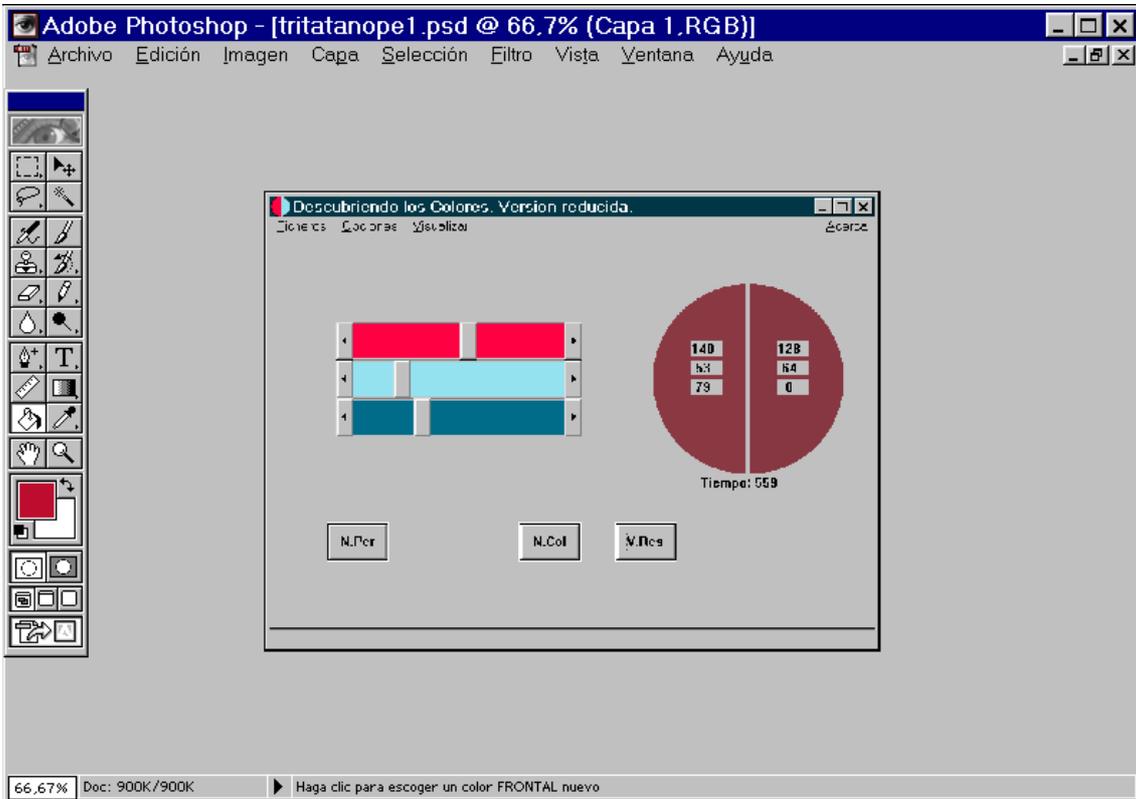
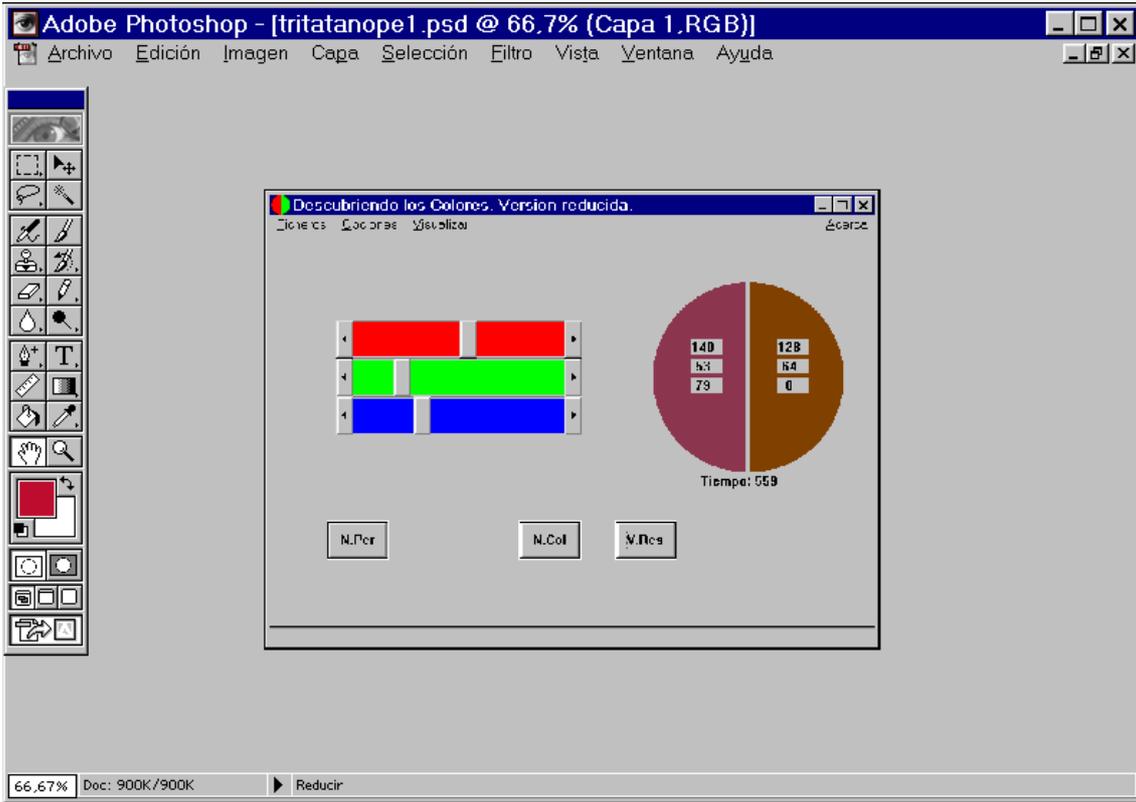
- PROTERANOPE 3



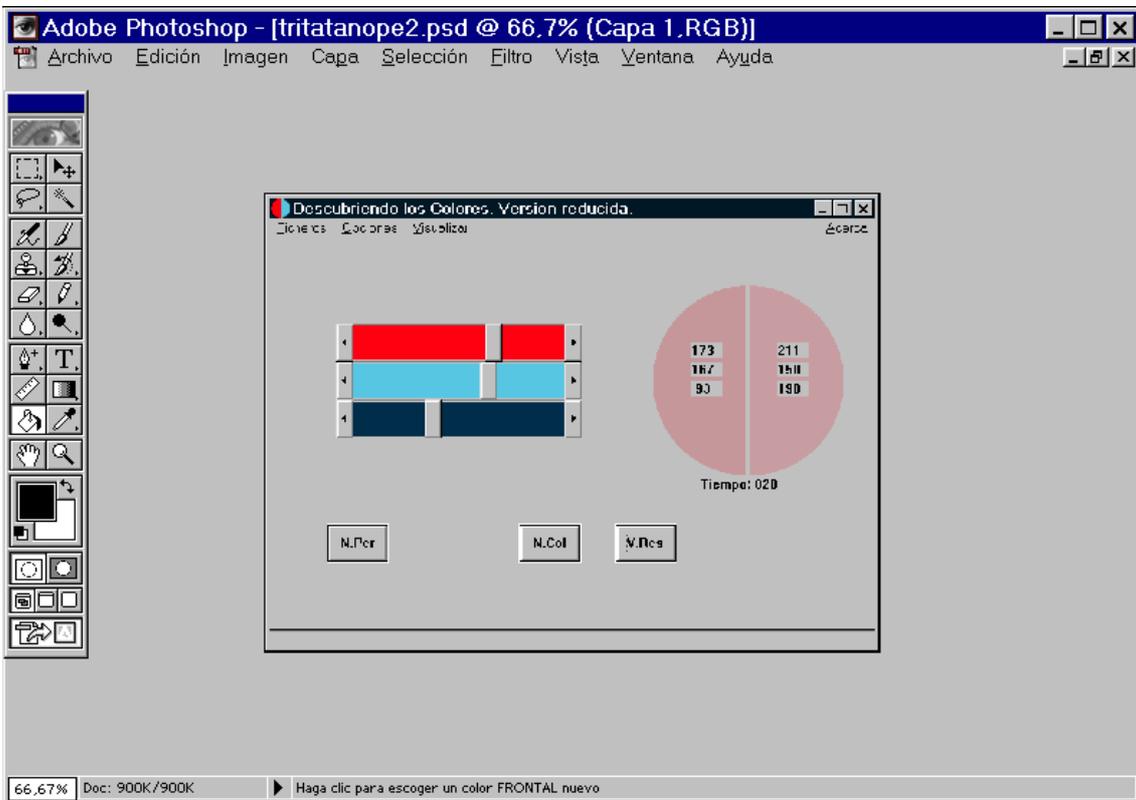
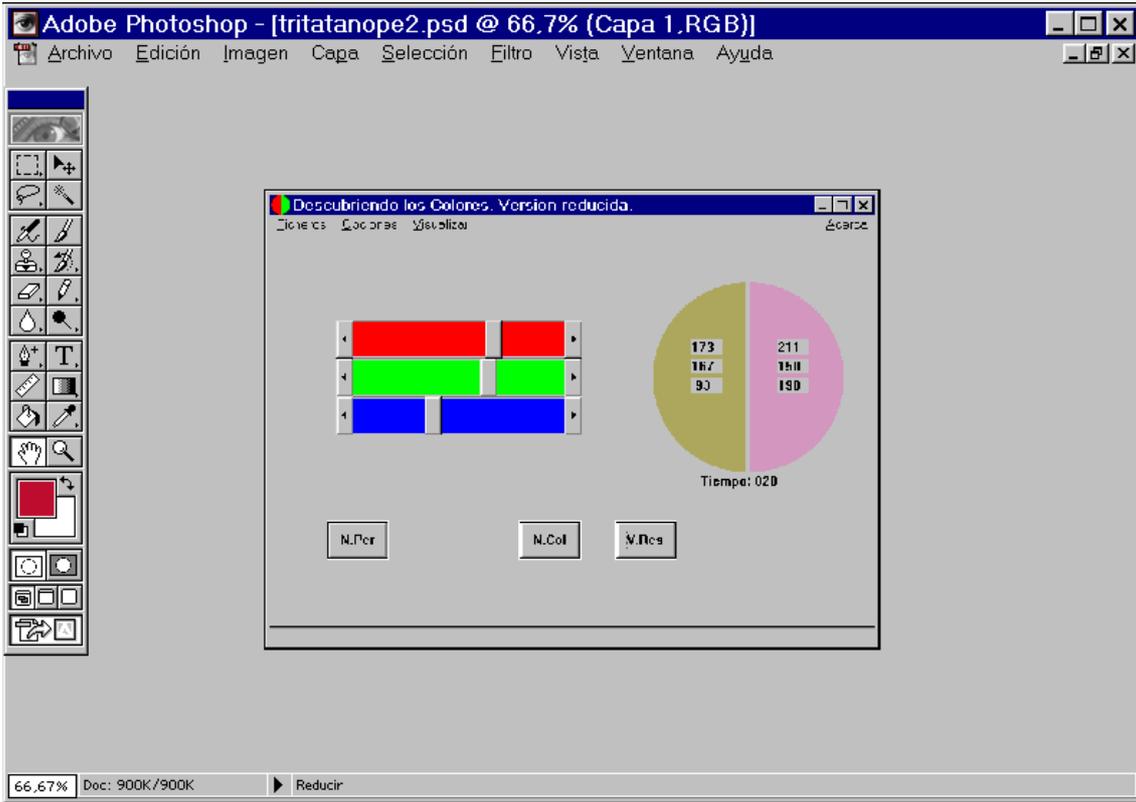
- PROTERANOPE 4



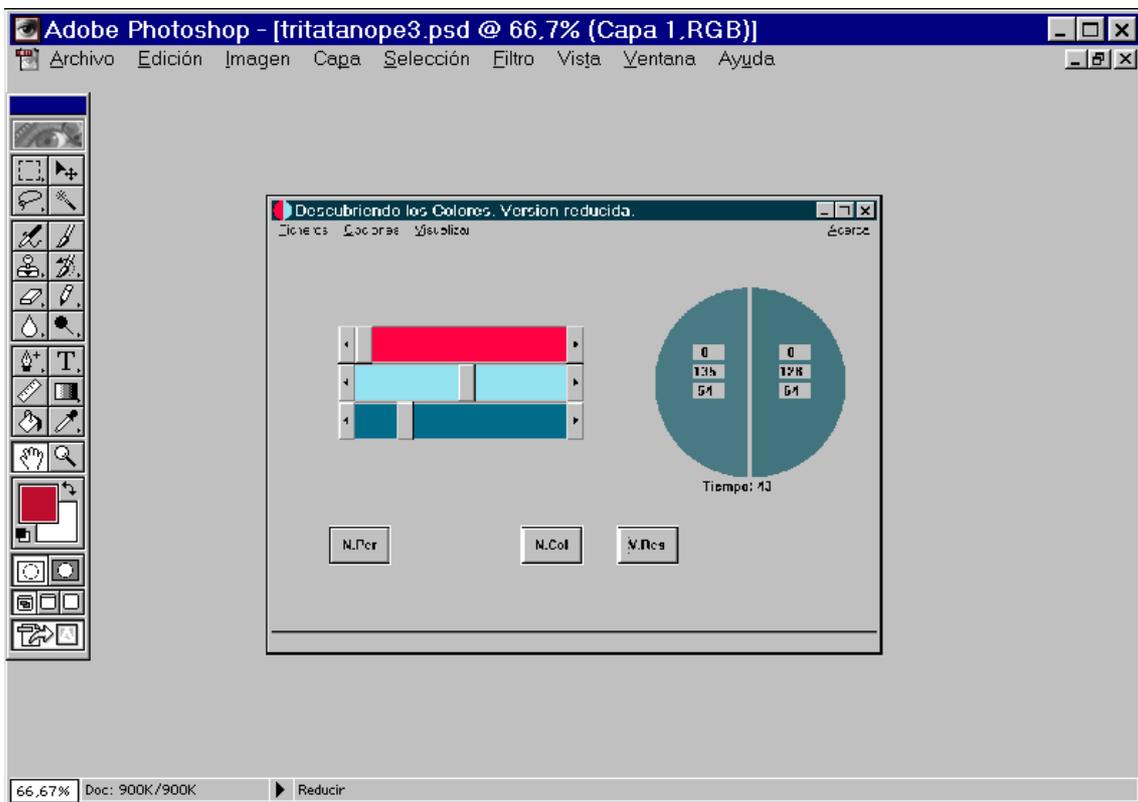
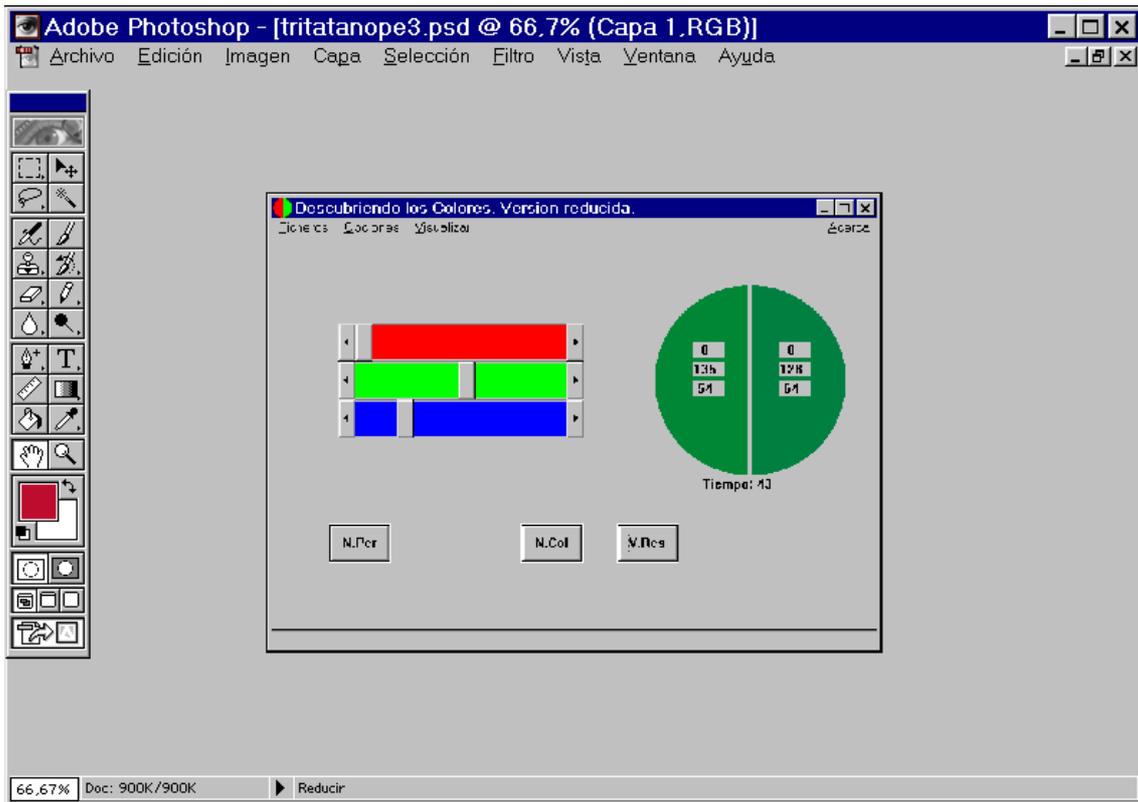
- TRITANOPE 1



- TRITANOPE 2



- TRITANOPE 3



- TRITANOPE 4

